FIS 3673

ANGELO BATTELLI

CORSO DI FISICA

PER GLI ISTITUTI TECNICI

VOLUME II.

Calore - Ottica - Elettricità e Magnetismo

Meteorologia

SECONDA EDIZIONE

BOLOGNA

NICOLA ZANICHELLI

FIRENZE - ROMA - MILANO - PISA - R. Bemporad & F.

NAPOLI - Fratelli Treves

TORINO - S. Lattes & C. — PALERMO - Alberto Reber

Fic BAT COR 2.e 2
R.L.A. 8038
Precisazione inventariale: V.1; 2 2e; 3 rilegati insieme

PROPRIETÀ RISERVATA

Reggio-Emilia — Cooperativa Lavoranti Tipografi - 1912

CALORE

La temperatura dei corpi.

1 — **Scala delle sensazioni termiche.** — Quando tocchiamo un corpo qualsiasi, proviamo fra l' altre una sensazione che esprimiamo dicendo: il corpo *A* è caldo, il corpo *B* è tiepido, il corpo *C* è freddo. E dato un certo numero di corpi, per esempio: neve con sale, ghiaccio, acqua fresca, corpo umano, cera fusa, acqua bollente, etc., toccandoli direttamente, sappiamo dire spesso con certezza in che ordine bisogna disporli, affinchè ciascuno sia più caldo di quelli che lo precedono e più freddo di quelli che lo seguono; ossia, sappiamo formare una *successione*, o *scala*, *termica* dei corpi che tocchiamo. Sappiamo dire inoltre se, fra i corpi che esaminiamo, ve ne siano due o più che nella scala siano da porre approssimativamente nello stesso posto.

Ognuno dei posti della successione dei corpi così ordinati ci dà una *temperatura;* e indicare la temperatura di un corpo significa appunto assegnare il posto che esso occupa in quella successione.

Per tal modo risulta chiaro il significato scientifico che noi attribuiremo ad espressioni come le seguenti: « la tale acqua termale *ha la temperatura* del corpo umano; la temperatura di fusione della cera *è compresa* tra quella del corpo umano e quella dell' acqua bollente, ecc. ».

Spesso la conoscenza della temperatura dei corpi può aversi senza toccarli, perchè l' esperienza ci insegna che due corpi,

messi a contatto, dopo un tempo più o meno lungo acquistano la stessa temperatura *(principio dell' uguaglianza delle temperature fra i corpi in contatto)*. Per es., ponendo un' asta metallica nel ghiaccio, sappiamo che dopo un po' di tempo la temperatura dell' asta è uguale a quella del ghiaccio.

2 — **Cause accidentali che falsano le sensazioni termiche.** — Ora, qualche volta circostanze speciali ci traggono in inganno nei nostri giudizi sulla temperatura dei corpi.

Per es., mentre da un canto l' esperienza di tutta la vita ci insegna che corpi diversi posti in uno stesso ambiente acquistano una stessa temperatura, d' altro canto se in una medesima stanza — specialmente in una giornata fredda — tocchiamo un pezzo di legno e poi subito dopo uno di metallo, giudichiamo il primo più caldo del secondo. Così pure, se teniamo per qualche minuto una mano in acqua calda e l' altra in acqua fredda, e immergiamo poi contemporaneamente le due mani in acqua tiepida, la prima ci dà una sensazione di freddo e l' altra una sensazione di caldo.

Si capisce che con una fine educazione dei sensi possiamo anche rendere i nostri giudizi indipendenti da parecchie delle accidentali cause di errore; e possiamo accorgerci se un medesimo corpo, nella scala delle temperature, si è spostato in un senso o nel senso contrario: per cui diciamo, ad es., che un corpo *A* si è riscaldato, o che un altro corpo *B* si è raffreddato.

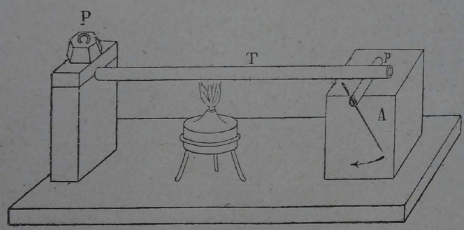


Fig. 1

3 — **Indicatori fisici della temperatura.** — Ma le variazioni di temperatura ed il senso in cui esse avvengono, possono assai meglio rendersi manifeste con altri indizi basati sulla attenta osservazione di qualcuna delle proprietà fisiche dei corpi. Vediamone qualche esempio:

1.° Disponiamo un tubo metallico *T* (fig. 1) orizzontalmente con gli estremi appoggiati su due pezzi di legno, e fissiamolo ad una estremità con un peso *P*, ponendo all' altra estremità, tra il legno e il tubo, in direzione perpendicolare a quest' ultimo, un sottile cilindretto *p*, a cui è fissata una pagliuzza *A* che ne rende visibili i movimenti di rotazione.

Se l' estremità libera del tubo si sposta in avanti o indietro, farà ruotare il cilindretto sottostante e con esso la pagliuzza. Orbene, scaldando il tubo metallico, vediamo la pagliuzza rotare nel senso della freccia, e ciò dimostra che il tubo si è allungato; e lasciando poi raffreddare il tubo, la pagliuzza gira in senso contrario e ci indica che esso si raccorcia.

2.° Prendiamo una boccetta di vetro, chiusa con un tappo nel quale passi un cannello di vetro a foro sottile (fig. 2), e ripiena di acqua colorata fino ad un tratto nero *S*, segnato sul cannello.

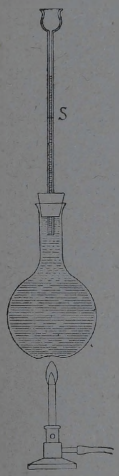


Fig. 2

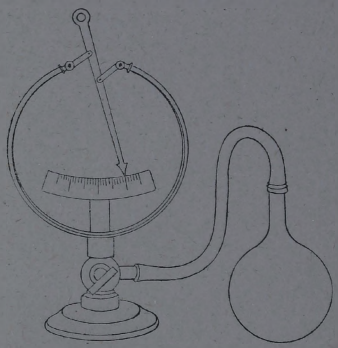


Fig. 3

Se scaldiamo la boccetta, vediamo che il liquido si innalza al di sopra del segno; se la raffreddiamo, scorgiamo che il liquido discende.

3.° Colleghiamo un manometro metallico, mediante un tubo di gomma a grossa parete (fig. 3), con un palloncino di vetro, e lasciamo il tutto riempito d' aria. Se scaldiamo il palloncino, il manometro segna subito un aumento di pressione, indicando

che l' aria del palloncino tende a dilatarsi; e segna una diminuzione di pressione quando il palloncino venga raffreddato.

Uno qualunque di cotali apparecchi, che potremo chiamare *indicatori di temperatura*, può servire spesso, con maggiore sensibilità e con maggiore esattezza che non le nostre sensazioni, a stabilire la successione dei corpi in ordine al loro stato termico.

Per esempio, avendo a disposizione la boccetta piena di liquido colorato, noi la terremo per alcuni minuti in contatto con ciascuno dei corpi che vogliamo esaminare, e faremo volta per volta sul cannello di vetro un segno in corrispondenza del punto a cui arriva il liquido; l' ordine in cui bisogna disporre i corpi riguardo alla loro temperatura è quello stesso dei rispettivi segni da noi fatti sul cannello.

Se poi adopreremo, per conoscere lo stato termico, un altro qualunque indicatore fisico, troveremo che, anche secondo le indicazioni che questo ci fornisce, i corpi risultano disposti, riguardo alla loro temperatura, *sempre nello stesso ordine* che ci aveva dato il primo strumento.

4 — **Uso dei numeri per contrassegnare le temperature.** — Per tradurre in numeri le indicazioni di detti strumenti, ad es. della boccetta piena di liquido colorato, basterà segnare sul cannello di questa un certo numero di punti equidistanti (fig. 4), e contraddistinguerli con i successivi numeri naturali, partendo da un punto qualunque.

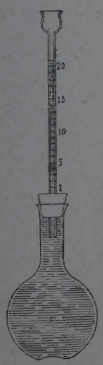


Fig. 4

5 — **Termometro.** — Per tal guisa sull' apparecchio — che allora prende il nome di *termometro* — viene ad essere segnata una scala, detta appunto *scala termometrica*. I criteri coi quali viene eseguita la divisione della scala possono essere, come vedremo, diversi; però debbono essere stabiliti con precisione, per gli opportuni confronti con altri apparecchi dello stesso tipo.

Quando il termometro venga mantenuto per un sufficiente tempo in contatto con un altro corpo, finisce per assumere la stessa temperatura. Il numero corrispondente al tratto della scala, a cui si ferma l' estremo del liquido nel cannello, si prende come *valore della temperatura del corpo in quella data scala.*

6 — **Termometro a mercurio.** — I termometri più usati sono costituiti da un cannello di vetro a foro capillare (fig. 5), ad un estremo del quale si trova un rigonfiamento, detto *bulbo*. Il cannello è ben calibro, cioè il suo foro interno è di diametro costante per tutta la lunghezza del tubo; e il bulbo e parte del cannello sono riempiti di mercurio.

Fig. 5

Il tubo deve essere a foro capillare, se si vuole che il termometro sia *sensibile*, cioè che, per una data variazione di temperatura, l' escursione del menisco del mercurio sia grande; e insieme sia *pronto*, cioè si metta presto in equilibrio termico col corpo di cui si cerca la temperatura. Difatti se il tubo è capillare il termometro riesce sensibile anche se il bulbo è piccolo, e allorquando il bulbo è piccolo il termometro è pronto.

7 — **Riempimento del termometro a mercurio.** — Per fare questa operazione, si scalda dapprima il bulbo per cacciarne buona parte dell' aria; poscia, capovolgendo l' apparecchio, repentinamente si immerge l' estremità aperta del tubo capillare entro un bicchiere contenente mercurio. Lasciando quindi raffreddare il bulbo, diminuisce la pressione dell' aria contenuta nell' interno, e la pressione esterna vi spinge un po' di mercurio. Si torna a porre allora il bulbo sulla fiamma portando il mercurio all' ebollizione: il vapore di mercurio svolgendosi scaccierà l' aria rimanente, e quindi tornando a capovolgere il cannello entro il bicchiere, si otterrà il riempimento dell' apparecchio.

Infine si porta di nuovo il bulbo sulla fiamma, facendo ancora bollire il mercurio, e quando si giudica che la quantità evaporata sia sufficiente, con un colpo di fiamma si salda — mentre ancora perdura l' ebollizione — l' estremo aperto del tubo capillare. Così nell'interno del tubo non resta traccia d'aria.

Si è notato che il bulbo del termometro, immediatamente dopo la bollitura, subisce una contrazione, che seguita anche qualche mese e perfino qualche anno. Perciò l' apparecchio preparato così, deve essere lasciato a sè molto tempo prima della graduazione, quando sia destinato a misure precise.

8 — **Punti fissi del termometro.** — Se un medesimo termometro dovesse servire ad indicare le variazioni di temperatura in ogni caso particolare, sarebbe sufficiente tracciare su di esso

divisioni equidistanti fra loro, per esempio di un millimetro, e numerarle dal principio alla fine del tubo colla successione dei numeri naturali. Ma noi dobbiamo necessariamente usare strumenti diversi nei differenti casi e confrontare le loro indicazioni: occorre perciò avere una scala che per una stessa temperatura dia lo stesso valore, qualunque sia lo strumento.

Si raggiunge lo scopo scegliendo due *punti fissi* della scala. gli stessi per ogni istrumento, corrispondenti a due date temperature fisse. I due punti fissi universalmente usati sono:

1.° la temperatura del ghiaccio fondente;

2.° la temperatura del vapore uscente dall' acqua che bolle, quando la pressione è di 760 mm. di mercurio.

Infatti, in un termometro, che in queste condizioni sia posto nel ghiaccio o nei vapori d' acqua bollente, la colonna del mercurio rimane ad altezza invariabile, sia quando il ghiaccio fonde, come quando l' acqua bolle.

La lunghezza del cannello compresa fra questi due punti fissi si divide in parti uguali, che si chiamano *gradi*.

Scale termometriche.

9 — **Scala Celsius o centigrada.** — Nella scala *centigrada*, dovuta allo svedese Celsius, — ormai la sola usata per gli scopi scientifici — la temperatura del ghiaccio fondente è segnata con 0, e quella del vapore d' acqua, che bolle sotto la pressione di 760$^{mm.}$, con 100; e l' intervallo è diviso in 100 parti. Tale scala si distingue scrivendo *C* dopo il numero indicante la temperatura; es. 10° *C*.

10 — **Scala Fahrenheit.** — Nella scala Fahrenheit la temperatura del ghiaccio fondente è indicata con 32, e quella del vapor d' acqua bollente con 212, l' intervallo essendo diviso in 180 parti uguali. Questa scala si segnala scrivendo *F* dopo il numero che dà la temperatura; es. 132° *F*.

Questa scala fu introdotta da Fahrenheit circa un secolo fa. Egli trovò che una mescolanza di ghiaccio e di sale ammoniaco, di cui del resto non indicò le proporzioni, dava una molto bassa e costante temperatura, che egli segnò con 0°.

Poi riconobbe che un' altra temperatura costante era pure quella del corpo umano; e seguendo il sistema duodecimale

inglese, segnò questo punto con 96, che è un multiplo di 12. In tale scala la temperatura del ghiaccio fondente corrisponde al numero 32 e quella dell' acqua bollente al 212.

11 — **Scala Réaumur.** — In questa scala le temperature del ghiaccio fondente e dell' acqua bollente sono indicate rispettivamente coi numeri 0 e 80, e l' intervallo è diviso in 80 parti uguali.

Il liquido adoperato dal Réaumur era alcool diluito con un quinto d' acqua. Il volume aumentava di $\frac{80}{10000}$ nel passare dalla temperatura del ghiaccio fondente a quella dell' acqua in ebollizione; perciò appunto, avendo contrassegnata la prima con 0, la seconda fu indicata con 80.

12 — **Conversione delle scale.** — Se indichiamo i valori di una stessa temperatura rispettivamente nelle tre scale con C, F, R, abbiamo evidentemente le uguaglianze

$$\frac{C}{100} = \frac{F - 32}{180} = \frac{R}{80},$$

mediante le quali si può convertire il numero indicante la temperatura in una scala in quello corrispondente in un' altra scala.

13 — **Determinazione dei punti fissi.** — Si determina il 1.° punto fisso immergendo il termometro in un recipiente che contenga ghiaccio in pezzetti o neve (fig. 6), e dal quale possa uscire l' acqua di fusione: quando la colonna di mercurio — la quale pure deve essere avvolta dal ghiaccio — è divenuta stazionaria da qualche tempo, si segna, con un tratto sul cannello, la posizione della sua sommità.

Per determinare il 2.° punto fisso, il termometro viene messo in un vaso di metallo a doppia parete, come è indicato dalla figura 7. Il vapore prodotto dall' acqua bollente in C, dopo aver circolato fra le due pareti del vaso, esce pel tubo h: così nell' interno il bulbo del termometro è difeso da ogni influenza della temperatura esterna. Nel punto del cannello, a cui si ferma la estremità della colonna di mercurio, che sporge appena dal vaso, si segna un tratto, ch' è il 2.° punto fisso, se la pressione atmosferica in quel momento è di 760 mm. di mercurio.

Se il barometro segnasse in quel momento una pressione atmosferica diversa, allora un' opportuna tabella, che dà la temperatura di ebollizione dell' acqua alle diverse pressioni, ci in-

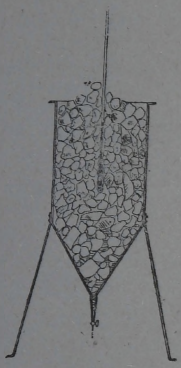


Fig. 6

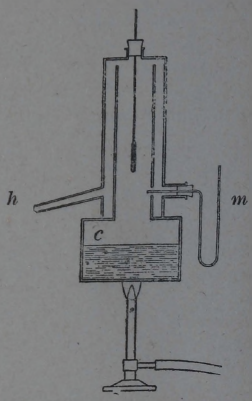


Fig. 7

dicherebbe il numero da segnare in corrispondenza di quel tratto, invece del 100 della scala centigrada.

Il manometro *m* serve a farci certi che la pressione interna non supera quella dell' aria esterna.

Dilatazione lineare dei solidi.

14 — Tutti i corpi subiscono, come abbiamo già verificato con l' esperienza, variazioni di dimensioni quando cambia il loro stato termico. In particolare, in un solido la distanza tra due punti varia col mutare della temperatura. Ciò si esprime dicendo che in generale ogni corpo riscaldato subisce una *dilatazione lineare*.

Per farci un' idea della grandezza di questa dilatazione prendiamo due bacchette di ottone *M*, *N* (fig. 8), le cui lunghezze — di circa un metro — differiscano tra loro di circa un millimetro, e fissiamo su di una tavola due dadi *A* e *B*, a distanza pari alla lunghezza esatta dell' asta più lunga *M*. Tuffiamo poi

per alcuni minuti le due aste nell'acqua in ebollizione, e trasportiamole quindi rapidamente fra i due dadi in senso longitudinale. Constatiamo allora che la più lunga, *M*, non passa fra *A* e *B*, e che l' altra vi passa appena. L' allungamento delle bacchette è stato dunque di circa un millimetro.

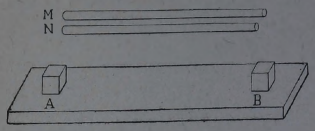


Fig. 8.

15 — Leggi della dilatazione lineare.

1.ª legge. — Se ora saldiamo l' una di seguito all' altra le due sbarre, e sperimentiamo in modo simile, troviamo che l' allungamento complessivo, per una data variazione di temperatura, è la somma di quelli che subisce ciascuna delle due sbarre per tale variazione di temperatura. Da ciò si inferisce che *l' allungamento di una sbarra omogenea è, per una data variazione di temperatura, proporzionale alla lunghezza della sbarra.*

V' è qualche sostanza che, posta in condizioni speciali, si accorcia in luogo di allungarsi quando venga riscaldata; ad es., il caucciù molto stirato.

2.ª legge. — Per vedere se due sostanze diverse ugualmente riscaldate subiscono, o no, a lunghezza uguale, lo stesso

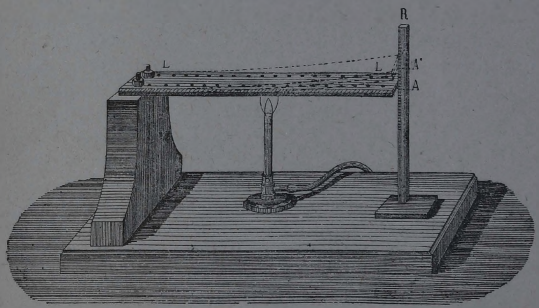


Fig. 9.

allungamento, ci serviremo di un regolo formato con due striscie uguali, una di ferro ed una di ottone, riunite insieme con chiodi ribaditi (fig. 9).

Fissiamo il regolo orizzontalmente per un estremo, colla striscia di ferro rivolta in su, e scaldiamolo con una lampada Bunsen. Se i due metalli si dilatassero ugualmente, il regolo dovrebbe allungarsi, ma non deformarsi. Invece vediamo che esso si incurva leggermente verso l' alto. Questo prova che il metallo inferiore (l' ottone) si è allungato di più che il metallo superiore (il ferro). Dunque, *a parità di condizioni, cioè a lunghezza uguale e per la stessa variazione di temperatura, le varie sostanze subiscono allungamenti diversi.*

3.ª legge. — Conviene conoscere ora quale relazione passa fra gli aumenti di temperatura prodotti in un' asta e gli allungamenti che essa subisce.

A tale scopo adopreremo il tubo di ottone usato nell' esperienza del § 3, ricoprendolo però con nastro di flanella e infilandovi, in vicinanza degli estremi, due corti tubi di vetro che stringano bene (fig. 10).

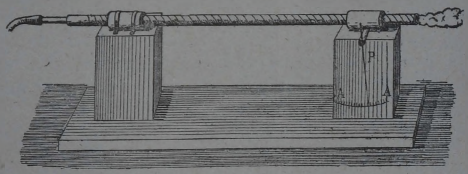


Fig. 10

Disporremo il tubo su due sostegni, come nel § 3, e, per rendere misurabili gli allungamenti, segneremo di fronte alla estremità inferiore della pagliuzza mobile P un arco graduato $A\ A$, avente il centro sull' asse di rotazione di essa.

Da principio teniamo l' apparecchio alla temperatura dell' aria ambiente, che sia per es. 15°, ed allora la pagliuzza corrisponda allo 0 della graduazione.

Indi facciamo passare, per qualche tempo, attraverso il tubo, il vapore svolgentesi da una bottiglia d' acqua bollente. Il tubo assumerà la temperatura di 100°, e per l' allungamento avvenuto la pagliuzza indicherà allora una certa divisione n.

Infine facciamo passare per il tubo vapore di alcool. Questa volta il tubo acquisterà la temperatura di 78° e la pagliuzza si fermerà alla divisione n'.

I due aumenti di temperatura sono, nel primo caso $100 - 15 = 85$, nel secondo $78 - 15 = 63$; e il rapporto fra

questi due numeri è 85 : 63 = 1,35. Orbene, troviamo che anche il rapporto fra n ed n' ha presso a poco questo valore, cioè $n : n' = 1,35$.

Ripetendo però queste misure con apparecchi di maggiore precisione, si vede che la proporzionalità tra gli allungamenti e le variazioni di temperatura sussiste soltanto quando queste ultime sono contenute entro limiti molto ristretti. Per grandi variazioni di temperatura la proporzionalità non si mantiene più: per es., una spranga di ferro di 1 metro, riscaldata da 0 a 100°, si allunga di 1,16 millimetri, mentre se viene riscaldata da 0 a 300° si allunga di mm. 4,4.

Possiamo quindi enunciare che, *partendo da una stessa temperatura, entro limiti sufficientemente ristretti, gli allungamenti sono proporzionali agli aumenti della temperatura.*

16 — Coefficiente di dilatazione lineare. — Nei limiti di temperatura entro i quali è applicabile la 3.ª legge, risulta dunque che l' allungamento di un' asta, quando viene riscaldata di t gradi, è uguale a t volte quello della stessa asta riscaldata di 1 grado. Quindi, per poter stabilire un' espressione che ci rappresenti l' allungamento per una variazione qualunque di temperatura, si è dato il nome di *coefficiente di dilatazione lineare* di una determinata sostanza *al valore numerico dell' allungamento che subisce un' asta della sostanza medesima, che abbia la lunghezza uguale alla unità, quando venga riscaldata di un grado.*

S' intende sempre implicitamente che l' unità di misura dell' allungamento sia quella stessa che serve per la misura della lunghezza dell' asta: e perciò il coefficiente di dilatazione è un numero λ, indipendente dalla scelta dell' unità di misura delle lunghezze. Per fissare le idee, adottiamo il metro come unità di misura; risulta allora dalle leggi enunciate che, se il riscaldamento è di t gradi,

per un' asta di 1 metro l' allungamento è λt metri
» » » 2 metri » $2\lambda t$ »
» » » l_o » » $l_o \lambda t$ »

La lunghezza l_o sia precisamente quella che l' asta ha a 0°, e chiamiamo l_t la sua lunghezza a $t°$; allora l' allungamento subìto dall' asta è dato dalla differenza $l_t - l_o$, e perciò

$$l_t - l_o = l_o \, . \, \lambda \, . \, t,$$

od anche

$$l_t = l_o (1 + \lambda t); \qquad (1)$$

formula che, nei limiti di temperatura entro cui è valida la 3.ª legge della dilatazione, risolve il problema di calcolare la lunghezza a $t°$, quando sia nota la lunghezza a 0°, e colla quale si può calcolare anche la lunghezza a 0°, data quella a $t°$.

Dilatazione cubica.

17 — Quando si riscalda un solido di forma qualsiasi tutte le sue dimensioni aumentano, proporzionatamente, se si tratta, come supporremo, di corpi *isotropi*, cioè aventi costituzione uguale in tutte le direzioni; e il corpo aumenta perciò di volume, mantenendo forma simile alla primitiva.

I corpi non isotropi, quali il legno e i corpi cristallizzati non appartenenti al sistema monometrico, hanno coefficiente di dilatazione lineare diverso nelle diverse direzioni, e quindi, al variare della temperatura, non mantengono forma simile alla primitiva. I legni, ad es., si dilatano di più perpendicolarmente alle fibre, che secondo le fibre.

18 — **Leggi della dilatazione cubica dei solidi.** — Le leggi che si riferiscono alla dilatazione cubica dei solidi si deducono da quelle relative alla dilatazione lineare, e sono le seguenti:

1.ª Gli aumenti di volume sono, a parità di condizioni, diversi per le diverse sostanze.

2.ª Gli aumenti di volume, entro limiti ristretti di temperatura, sono proporzionali alle variazioni di temperatura.

3.ª Il coefficiente di dilatazione cubica, cioè l'aumento dell'unità di volume per l'incremento di temperatura di un grado, è approssimativamente triplo del coefficiente di dilatazione lineare.

Consideriamo, infatti, per semplicità, un cubo di una qualunque sostanza — ad es. di ferro — il cui lato sia di 1 centimetro, ad una certa temperatura.

Se scaldiamo di *un* grado il cubo, il suo lato diventerà

$$1 + \lambda,$$

dove λ è il coefficiente di dilatazione lineare del ferro. E quindi il nuovo cubo avrà il volume

$$(1 + \lambda)^3 = 1 + 3\lambda + 3\lambda^2 + \lambda^3.$$

Ora, il coefficiente λ, per tutte le temperature comprese fra 0° e 100°, è approssimativamente 0,000012 pel ferro, e 0,000031 per il metallo più dilatabile, lo zinco; quindi i valori di λ^2 e λ^3 sono tanto piccoli da potersi trascurare. Per cui il nuovo cubo avrà il volume

$$1 + 3\lambda$$

e quindi l' aumento di volume avvenuto nel cubo primitivo è 3λ cm^3.

Nello stesso modo possiamo dimostrare che se scaldiamo di 2 gradi il cubo, il volume che esso assume diviene

$$1 + 6\lambda,$$

cioè che il suo aumento di volume è 6λ; e così di seguito.

Un corpo di forma qualunque si può immaginare suddiviso in un numero grandissimo di piccoli cubi e perciò si può ammettere che, anche per un corpo di qualsiasi forma, l' aumento dell' unità di volume sia 3λ per 1 grado, 6λ per 2 gradi, essendo λ il suo coefficiente di dilatazione lineare. E poichè questo ha valore diverso per le diverse sostanze, possiamo ritenere dimostrate le leggi esposte.

Da esse, con ragionamento perfettamente simile a quello del § 16, e ammettendo la proporzionalità, per una data variazione di temperatura, tra l' aumento di volume e il volume primitivo (proporzionalità che consegue da quella tra l'aumento di lunghezza e la lunghezza primitiva, nella dilatazione lineare) possiamo dedurre la formula:

$$V_t = V_0 (1 + kt) \qquad (2)$$

dove V_t e V_0 sono i volumi che un dato corpo possiede a $t°$ e a 0° e k è il suo coefficiente di dilatazione cubica ($k = 3\lambda$).

Dilatazione dei liquidi.

19 — Per i liquidi non si può, come per i solidi, dedurre la dilatazione cubica da quella lineare, perchè quest' ultima per essi non ha esistenza concreta; è quindi necessario per essi fare la misura diretta della dilatazione cubica.

Ma il liquido deve essere contenuto entro un recipiente, e questo per sua parte si dilata sotto l' azione del riscaldamento.

20 — **Dilatazione assoluta e dilatazione apparente.** — Si usa perciò nei liquidi distinguere la *dilatazione assoluta* dalla *dilatazione apparente*.

La *dilatazione apparente* è l' aumento apparente di volume che subisce un liquido, contenuto in un vaso che si dilati meno di esso. È tale, ad esempio, la dilatazione del mercurio e dell' alcool nei termometri.

La *dilatazione assoluta* è l' aumento reale che avviene nel volume di un liquido, astrazion fatta dalla variazione di volume del recipiente.

Si può ritenere che *la dilatazione assoluta sia uguale alla dilatazione apparente più la dilatazione del recipiente.*

Si rende visibile l' influenza della dilatazione del recipiente immergendo nell' acqua bollente la boccetta della fig. 2 piena di acqua colorata. Si scorge dapprima un abbassamento del livello dell' acqua dovuto all' aumento di volume del recipiente che si riscalda per primo: dopo tale abbassamento, il livello comincia a salire e sorpassa assai l' altezza primitiva.

21 — **Dilatazione del recipiente.** — Quando adunque si voglia ottenere la dilatazione assoluta di un liquido, a meno di non ricorrere a metodi indiretti, bisogna conoscere la dilatazione del recipiente. Ora, questa si può misurare sperimentalmente con un metodo di precisione, che accenneremo in seguito, ma si può anche calcolare approssimativamente, in base al fatto che l' aumento di capacità di un recipiente è uguale all' aumento di volume che subirebbe un nocciolo della stessa sostanza il quale lo riempisse esattamente.

Così, essendo il coefficiente di dilatazione lineare del vetro $\lambda = 0{,}000008$ e quindi quello cubico 0,000024, la capacità di

un recipiente di vetro cresce, per ogni unità di volume, e per ogni grado, di 0,000024.

E quindi, per una boccetta di vetro, p. es., di *10 centimetri cubici*, scaldata di *10 gradi*, l' aumento di capacità sarà di

$$10 \times 10 \times 0{,}000024 = 0{,}0024 \text{ centimetri cubici.}$$

22 — **Dilatazione diversa dei diversi liquidi.** — Se poniamo varii liquidi (alcool, etere solforico, benzina, ecc.) in boccette simili a quella della figura 4, di uguale capacità e con cannelli di diametro interno uguale, e riscaldiamo dello stesso numero di gradi, vediamo innalzarsi differentemente il livello dei diversi liquidi nei tubi: e possiamo da ciò dedurre che *i diversi liquidi hanno dilatazione apparente diversa in recipienti della stessa sostanza e quindi anche dilatazione assoluta* (§ 20) *differente*.

La loro dilatazione assoluta è molto più grande di quella dei solidi: quella del mercurio, che è il meno dilatabile, è circa sette volte e mezzo quella del vetro.

23 — **Dilatazione dell' acqua.** — Molto singolare è, per riguardo alla dilatazione, il comportamento dell' acqua.

Infatti, riempiamo di acqua un bulbo di vetro della capacità di alcuni centimetri cubi, sormontato da un tubo del diametro di circa un millimetro (fig. 11): immergiamolo nel ghiaccio fondente e facciamo un segno *a* nel punto in cui si ferma il liquido. Estraendolo dal ghiaccio, e portandolo in un bagno a temperatura ordinaria, osserviamo che l' acqua nel cannello, anzichè innalzarsi, si abbassa fino a un certo punto *a'*, con movimento sempre più lento; indi comincia a salire, dapprima lentamente, poi più rapidamente, e l' innalzamento continua sempre aumentando la temperatura del bagno. Il livello dell'acqua si trova in *a'* quando la temperatura è circa di + 6°, e, a partire da questa temperatura, il detto livello si innalza non solo per il riscaldamento, ma anche pel raffreddamento. Perciò il livello dell' acqua si trova in *a*, sia quando la temperatura di essa è 0°, sia anche quando è circa 11°. L' acqua dunque, nel vetro, presenta a + 6° un volume minore

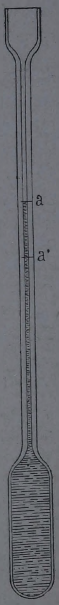


Fig. 11

non solo di quello a temperatura maggiore, ma anche di quello a temperatura minore: ha cioè un *minimo di volume*. Tenendo conto della dilatazione del vetro, si trova che l' acqua ha realmente il minimo volume a $+4°$: nel vetro essa presenta il minimo volume a una temperatura un po' più elevata perchè, in vicinanza del minimo, il suo volume varia pochissimo, di meno di quanto varia il volume del vetro. In un recipiente di quarzo assai minore sarebbe la differenza fra la temperatura del minimo volume apparente e di quello assoluto dell' acqua, perchè il quarzo è molto meno dilatabile del vetro.

24 — **Massimo di densità dell' acqua.** — Al minimo volume di un corpo corrisponde il massimo valore della sua densità: e si dice più comunemente *temperatura del massimo di densità*, invece di *temperatura del minimo volume*.

La temperatura del massimo di densità dell' acqua si può determinare nel modo seguente. Si riempie d' acqua pura, a temperatura ordinaria, un recipiente cilindrico (fig. 12), alto 20 o 30 centimetri: vi si immerge un termometro in modo che il bulbo sia vicino al fondo, e si mette del ghiaccio a galleggiare sull' acqua. Il ghiaccio fonde a poco a poco, raffreddando l' acqua superiore, la quale scende perchè diviene più densa della sottostante. La colonna del termometro si abbassa, ma arrivata a $+4°$, diventa stazionaria per qualche tempo: e ciò indica che tale è la temperatura dell' acqua, quando ne è massima la densità.

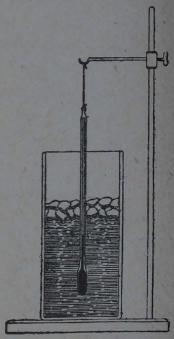


Fig. 12

25 — **Variazione della densità dei liquidi con la temperatura.** — La dilatazione dei liquidi si può determinare non solo con la misura degli aumenti di volume, ma anche con quella della diminuzione di densità.

Disponiamo col filo a piombo ben verticali due canne di vetro, *A B* e *C D* (fig. 13), di un paio di metri di lunghezza; riuniamole al di sotto fra loro per mezzo di un tubo di gomma, riempiamole, ad es., d' acqua, e scaldiamo una di esse. Appoggiando una squadretta ad uno dei tubi, vediamo allora che il liquido, il quale era in principio allo stesso livello nei due tubi, si va innalzando nel tubo *C D*.

Fra l' acqua calda e l' acqua fredda, poste in vasi comunicanti, si verifica dunque un dislivello dello stesso genere di quello che studiammo (Vol. 1, § 176) mettendo in un tubo ad U da una parte mercurio e dall' altra acqua.

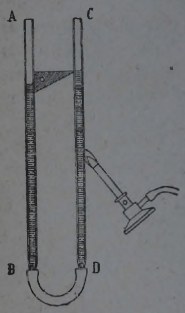


Fig. 13

Allora provammo che le altezze dei due liquidi, contate a partire dalla loro superficie di separazione, sono in ragione inversa delle rispettive densità.

Anche nel caso dell' acqua calda e dell' acqua fredda le altezze dei due livelli, contate dalla superficie di separazione, devono essere dunque in ragione inversa delle rispettive densità.

26 — Relazione fra la densità e la temperatura dei liquidi. — Le variazioni di densità di un liquido col variare della temperatura si possono facilmente calcolare, se di esso si conosce il coefficiente δ di dilatazione assoluta.

Infatti siano V_0 e V_t i volumi che una data massa di liquido assume a 0° ed a $t°$, e d ed x le corrispondenti densità. Sappiamo che

$$\frac{x}{d} = \frac{V_0}{V_t},$$

e siccome (§ 18)

$$V_t = V_0 (1 + \delta t),$$

si ha

$$x = \frac{d}{1 + \delta t}. \qquad (3)$$

27 — Metodo di Dulong e Petit per lo studio della dilatazione assoluta del mercurio. — Questo metodo è fondato su quanto abbiamo detto al § 25.

L' apparecchio adoperato differisce da quello della figura 13 in ciò, che i due tubi sono riuniti da un lungo tubo di vetro, a foro molto stretto, disposto orizzontalmente, e sono circondati, sino quasi alla loro estremità superiore, da cilindri metallici contenenti l' uno ghiaccio pesto, l' altro olio, il quale può essere riscaldato sino a circa 300°.

Le altezze del mercurio nelle due branche vengono misurate a partire dall' asse del tubo di comunicazione e tale misura può esser fatta con molta precisione mediante il catetometro (Vol. I, § 139), istrumento che Dulong e Petit immaginarono appunto a questo scopo.

Chiamate x e d le densità del mercurio, alla temperatura t° del mercurio riscaldato e a 0°, e h' e h le altezze rispettive, si ha (§ 25)

$$\frac{h}{h'} = \frac{x}{d}$$

e quindi per la (3) del § 26

$$\frac{h}{h'} = \frac{1}{1 + \delta t}$$

onde

$$\delta = \frac{h' - h}{h t}.$$

Il valore di δ è 0,000181.

Questo metodo, assai adatto per il mercurio, non si presta bene per lo studio della dilatazione degli altri liquidi, pei quali la dilatazione assoluta si deduce da quella apparente, aggiungendovi la dilatazione cubica del recipiente, determinata come indicheremo nel seguente paragrafo.

Fig. 14

28 — Misura della dilatazione dei liquidi col dilatometro. — Per studiare la dilatazione assoluta dei liquidi diversi dal mercurio, si ricorre ad apparecchi simili a quello da noi adoperato al § 4, che per questo uso prendono il nome di *dilatometri*. Essi sono costituiti da un grosso bulbo, di volume noto, sormontato da un cannello calibro, e diviso in parti di uguale lunghezza e di volume pure noto (fig. 14). Anzitutto si determina la dilatazione dell' apparecchio. A tal uopo si riempie di mercurio fino a una determinata divisione, e si misura la dilatazione apparente del mercurio fra due date temperature, per es. fra 0° e 100°; sottraendola dalla dilatazione assoluta — già nota — del mercurio, si ottiene la dilatazione del dilatometro.

Allora, se per un dato liquido si eseguisce la determinazione della dilatazione apparente fra quelle due temperature, aggiungendo ad essa la dilatazione dell' apparecchio, si ha la dilatazione assoluta del liquido.

Dilatazione dei gas.

29 — I gas sono molto dilatabili; e possiamo della loro dilatabilità dare una misura con una facile esperienza.

Prendiamo un palloncino di vetro, e teniamolo per qualche minuto entro un recipiente (fig. 15) in cui bolla dell' acqua: l' aria si dilata ed esce.

Indi, chiuso il palloncino con un sughero e toltolo dall' acqua bollente, immergiamone il collo in una vaschetta d' acqua (fig. 16), togliamo il sughero e attendiamo che l' aria rimasta entro il pallone a poco a poco ritorni alla temperatura ordinaria.

Infine affondiamo il palloncino entro l' acqua della vasca, sino a quando l' acqua all' interno ed all' esterno del pallone si trovi allo stesso livello. La massa d' aria interna al pallone si trova allora alla pressione atmosferica e alla temperatura

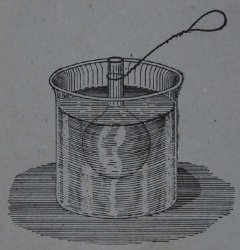


Fig. 15

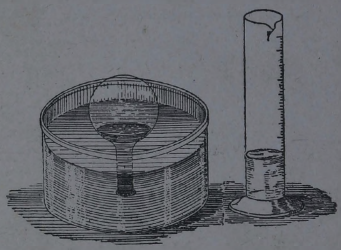


Fig. 16

ordinaria, e questa massa è la stessa che alla temperatura dell' acqua bollente occupava l' intero volume del palloncino. Per avere la diminuzione subita dal volume dell' aria nel passare da 100° alla temperatura dell' ambiente, si tappa il palloncino, e l' acqua che vi è restata internamente si versa poi in una campanella graduata che ce ne dà il volume.

Chiamato V il volume del palloncino e v quello letto sulla campanella, possiamo dire che il volume $V-v$ d' aria, passando

dalla temperatura ordinaria a 100° e mantenendo la pressione atmosferica, subirebbe l' aumento v. Quindi

$$\frac{v}{V - v}$$

è l' aumento dell' unità di volume dell' aria per il passaggio dalla temperatura ordinaria a 100°, quando la pressione si conserva la stessa.

30 — 1.ª legge di Gay-Lussac sulla dilatazione dei gas. — Se facciamo l'esperienza analoga con altri gas, per es. ossigeno, gas illuminante, ecc., troviamo che questi, per lo stesso riscaldamento, subiscono approssimativamente lo stesso aumento di volume che abbiamo trovato per l' aria.

Possiamo quindi concludere che *la dilatazione termica di un gas è indipendente dalla natura del gas medesimo.*

31 — 2.ª legge di Gay-Lussac. Coefficiente di dilatazione dei gas. — Cerchiamo ora quale rapporto esista, nella dilatazione dei gas, fra gli aumenti di volume e gli aumenti di temperatura.

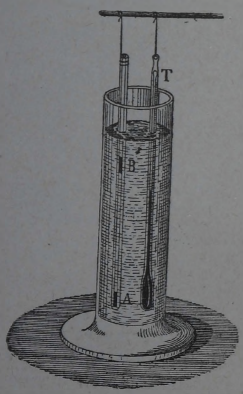


Fig. 17

Prendiamo a tale scopo un cannello di vetro di circa 2 millimetri di diametro, pieno d' aria, chiuso ad un estremo A (fig. 17), ed introduciamovi due goccie di mercurio: una in A, al fondo, e l' altra in B, verso il mezzo. Mettiamo il cannello nel ghiaccio, e con un regolo diviso in millimetri misuriamo la distanza l fra A e B. Assumendo come unità di volume quello che nell' interno del cannello è compreso fra due divisioni consecutive del regolo, il volume dell' aria rinchiusa fra A e B a 0° è espresso dal numero l.

Mettiamo di poi il cannello in un recipiente ove circolino i vapori d' acqua in ebollizione, e misuriamo quindi il nuovo volume dell' aria tra le due goccie.

Troviamo allora che l' aria — oppure un altro gas qualunque — che a zero gradi occupi, sotto una data pressione, il volume di 273 centim. cubici, occupa a 100°, e sotto la stessa pressione, approssimativamente il volume di cm.³ 373. Vale a dire che *il volume di un gas sotto pressione costante da 0° fino a 100°, aumenta, per ogni grado di temperatura centigrada, di* $\frac{1}{273}$ *del valore che ha a 0°.*

Questo risultato costituisce appunto la *seconda legge di Gay-Lussac.* Il numero

$$\frac{1}{273} = 0{,}00366$$

dicesi *coefficiente di dilatazione dei gas a pressione costante.* Ne segue che chiamando V_t e V_0 i volumi di una data massa di gas a $t°$ e a 0° a pressione costante, si ha

$$V_t = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right). \qquad (4)$$

Variazione di tensione dei gas riscaldati a volume costante.

32 — Invece di tenere costante la pressione del gas mentre si riscalda e misurare le variazioni di volume, possiamo mantenerne inalterato il volume e seguire le variazioni della pressione. Ricordiamo a questo proposito l' esperienza già descritta parlando dei diversi indicatori di temperatura (§ 3). Allora collegammo un palloncino di vetro ad un manometro metallico, e riscaldando l' aria del palloncino vedemmo che la sua pressione, o tensione, aumentava.

Le esperienze fatte a varie temperature ci danno le leggi relative a queste variazioni di pressione (*leggi relative all' aumento di tensione dei gas scaldati a volume costante*); esse sono analoghe a quelle riguardanti l' aumento di volume a pressione costante, e sono:

1.ª *L' aumento di tensione, che un gas subisce a volume costante per effetto del riscaldamento, è indipendente dalla natura del gas.*

2.ª *L' aumento di tensione subìto da un gas nel passare da 0° a 100° è, per ogni grado di temperatura centigrada,* $\frac{1}{273}$ *della tensione che il gas possiede alla temperatura del ghiaccio fondente, se il volume del gas rimane costante.*

In questo caso il numero $\frac{1}{273}$, che rappresenta l' aumento per ogni grado di temperatura dell' unità di tensione a 0° quando il gas viene scaldato a volume costante, si chiama *coefficiente di tensione* o più comunemente, ma meno propriamente, *coefficiente di dilatazione a volume costante.*

Il coefficiente di tensione dei gas è dunque uguale al loro coefficiente di dilatazione propriamente detto.

Ne segue che fra le tensioni H_0 e H_t, che un gas sotto volume costante possiede a 0° e a $t°$, passa la stessa relazione che abbiamo trovata per i volumi a 0° e a $t°$ sotto pressione costante, cioè

$$H_t = H_0 \left(1 + \frac{1}{273} t\right). \qquad (5)$$

Il valore del coefficiente di tensione si può ottenere assai esatto con questa esperienza dovuta al prof. Bongiovanni.

Un grosso pallone di vetro è chiuso da un tappo di gomma attraversato da un tubo capillare, piegato due volte ad angolo retto (fig. 18): si immerge il pallone nell' acqua, si scalda fino all' ebollizione, e quando si giudica che l' aria del pallone abbia preso la temperatura dell' acqua, si introduce l' estremità del tubo in un bicchierino contenente mercurio. Togliendo allora l' acqua bollente, il mercurio sale nel tubo, e ciò mostra che per il raffreddamento la tensione dell' aria diminuisce. Il sollevarsi del mercurio nel tubo produce una diminuzione trascurabile del volume dell' aria, essendo il pallone molto grande e il tubo molto stretto: si può quindi ammettere che il volume dell' aria sia rimasto costante.

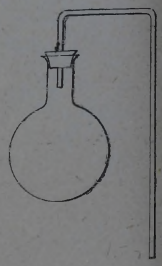


Fig. 18

Se indichiamo con h l' altezza a cui giunge il mercurio quando sia stato circondato il pallone di ghiaccio pesto, corretta dalla depressione capillare, la pressione dell' aria in esso

è allora $H_t - h$, se H_t rappresenta l'altezza barometrica nel momento dell'esperienza. E poichè alla temperatura t dell'acqua bollente l'aria aveva la pressione atmosferica H_t, che può ritenersi rimasta nel frattempo costante, e un volume uguale a quello che ha alla temperatura di 0°, deve essere

$$H_t = (H_t - h)\ (1 + \beta t),$$

indicando con β il coefficiente di tensione. Da questa si ricava il valore di β.

33 — **Dati precisi sui coefficienti di dilatazione e di tensione dei gas.** — Mediante altre esperienze eseguite colla massima cura, specialmente dal Regnault, furono determinati con esattezza i coefficienti di dilatazione e di tensione dei gas fra 0° e 100°, che indicheremo rispettivamente con α e β. Risultò in tal modo che il coefficiente β differisce pochissimo da α. Regnault trovò per l'aria a pressione normale

$$\alpha = 0{,}0036706$$
$$\beta = 0{,}003665.$$

Per l'idrogeno

$$\alpha = 0{,}0036613$$
$$\beta = 0{,}0036678.$$

I coefficienti α e β non sono indipendenti dalle pressioni come si credeva prima, per le esperienze del Davy, ma per piccole pressioni le variazioni sono assai piccole. Ad es., per l'aria a 3 atmosfere si ha:

$$\alpha = 0{,}0036954,$$

e per l'idrogeno

$$\alpha = 0{,}0036616.$$

Gas ideali.

34 — Per quanto i gas non seguano con esattezza le leggi di Gay-Lussac — e neppure la legge di Boyle, come abbiamo visto in altra parte del libro (Vol. I, § 204) — pure nella maggior parte delle applicazioni pratiche si può senza errore sensibile ammettere la validità di queste leggi.

Con ciò alla considerazione dei *gas reali* si viene a sostituire quella di *gas ideali* (regolati, cioè, dalle leggi di Boyle e di Gay-Lussac), che semplificano la risoluzione di molti problemi.

Ad esempio, pei gas ideali si può mostrare facilmente che le leggi relative alle variazioni di tensione per riscaldamento, e quelle relative alla dilatazione sotto pressione costante, sono conseguenza le une delle altre.

Sia, infatti, una massa gassosa che alla temperatura di 0° abbia il volume v e la pressione p. Mantenendo la pressione costante, si scaldi a $t°$: il gas acquista un nuovo volume V dato da

$$V = v\,(1 + \alpha t).$$

Si ha così una massa gassosa di volume V alla pressione p e alla temperatura t. Si comprima, mantenendo invariata la temperatura, in modo da ridurla ancora al volume v: la pressione acquisterà un nuovo valore P, che per la legge di Boyle sarà

$$P = p\,\frac{V}{v} = p\,(1 + \alpha t),$$

che esprime appunto la 2.ª legge relativa alle variazioni di tensione.

Termometro a gas.

35 — Poichè l' aria, l' ossigeno, l' idrogeno, l' azoto, ecc., possono subire variazioni nel loro stato termico molto maggiori che non i liquidi, senza mutare di stato di aggregazione, cioè restando allo stato di gas, è preferibile scegliere uno di quei gas come indicatore di temperatura.

Si avrà così un *termometro a gas*, che può essere graduato seguendo due vie diverse. La prima consiste nel lasciare il gas espandersi a pressione costante, e corrisponde a quella adottata per il termometro a mercurio.

Siccome un gas, passando dalla temperatura del ghiaccio fondente a quella dell' acqua in ebollizione, subisce un aumento di $\frac{100}{273}$ del volume iniziale V_0, se si vuole una scala centesimale, potremo stabilire che ad una variazione di volume di $\frac{1}{273}$ di V_0 corrisponda la variazione di un grado di tempe-

ratura, e cioè potremo calcolare la temperatura t dal volume V mediante la formula

$$V_t = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right). \qquad (4)$$

La seconda via consiste nell' obbligare il gas ad occupare un volume costante, e dedurre la temperatura dalle variazioni della pressione, valendosi della formula

$$H_t = H_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right). \qquad (5)$$

Si preferisce appunto seguire questa seconda via.

Siccome per un gas, conformemente alla 2.ª legge di Gay-Lussac, la pressione tra 0° e 100° subisce un incremento uguale per ogni grado di temperatura, le indicazioni del termometro a gas concordano con quelle del termometro a mercurio. Però al disotto di 0° e al disopra di 100° i gas si scostano sensibilmente dalla 2.ª legge di Gay-Lussac, e quindi le indicazioni dei due termometri cessano di essere identiche.

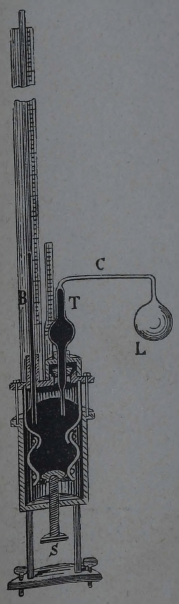


Fig. 19

Ora, negli usi scientifici si adopera, per le ragioni anzidette, il termometro a gas, e la temperatura viene calcolata dalle variazioni di pressione secondo la formula (5). Ciò evidentemente equivale a convenire che per il gas la pressione varî *sempre* proporzionalmente alla temperatura.

Una delle forme date al termometro a gas è rappresentata dalla figura 19. È costituita da un bulbo L di vetro, che, mediante un tubo capillare C ed un largo tubo T di vetro munito di una rigonfiatura, comunica con una vaschetta, in cui penetra anche una lunga canna di vetro verticale graduata, B. La vaschetta è riempita con mercurio, mentre nel bulbo L e nel cannello C è aria, o idrogeno, accuratamente disseccati.

Il fondo della vaschetta è spostabile in alto e in basso mediante una vite S; e, prima di ogni lettura del livello del mercurio nella canna B, si gira questa vite sino a quando il mercurio nel tubo T tocca una punta di vetro fissa nell'interno di questo tubo. Allora il numero letto indica il dislivello del mercurio fra i tubi T e B, dal quale si deduce la pressione del gas nel bulbo, e quindi anche la sua temperatura.

Ad es., supponiamo che, quando il bulbo L è posto nel ghiaccio fondente, nel ramo B il mercurio sia 4 centimetri più alto che in T. La pressione del gas in L è allora uguale, *in centimetri di mercurio*, alla pressione atmosferica — che sia, per es., di 75 centimetri — aumentata di 4 centimetri, cioè

$$H_0 = 75 + 4 = 79 \text{ centimetri.}$$

Mettiamo ora il bulbo L in una stufa, e alziamo il livello del mercurio in T fino a toccare di nuovo la punta: se in tal caso il livello del mercurio in B è 80 centimetri più alto che in T, abbiamo

$$H_t = 75 + 80 = 155 \text{ centimetri.}$$

Sostituendo questi valori nella formula (5), si ha

$$155 = 79 \left(1 + \frac{1}{273} t \right);$$

da cui si ricava, per la temperatura incognita t della stufa, il valore

$$t = 262{,}63.$$

Equazione caratteristica dei gas.

36 — Possiamo ora esprimere le leggi di Gay-Lussac testè enunciate, e insieme la legge di Boyle, con una sola formula.

Si consideri infatti una massa gassosa che abbia a 0° il volume v_0 e la pressione p_0, e che, riscaldata a $t°$, assuma il volume v e la pressione p.

Immaginiamo uno stato sussidiario, in cui la temperatura del gas sia t, come nello stato finale, e la pressione p_0, come nello stato iniziale; e indichiamo con v' il volume della massa gassosa in tale stato sussidiario. Il seguente specchietto fa vedere a colpo d' occhio la temperatura, la pressione e il volume nei tre stati.

	Temp.	Press.	Volume
1) stato iniziale	0	p_0	v_0
2) stato sussidiario	t	p_0	v'
3) stato finale	t	p	v.

Il passaggio dallo stato 1) allo stato 2) avviene a pressione costante; avremo quindi, per le leggi di Gay-Lussac,

$$v' = v_0 (1 + \alpha t).$$

Il passaggio dallo stato 2) allo stato 3) avviene a temperatura costante; per la legge di Boyle si ha dunque

$$p v = p_0 v'.$$

Sostituendo a v' il suo valore dato dall' uguaglianza precedente, si ottiene

$$p v = p_0 v_0 (1 + \alpha t),$$

ossia

$$\frac{p v}{1 + \alpha t} = p_0 v_0. \qquad (6)$$

Analogamente, se nello stato finale la temperatura fosse stata T, la pressione P, il volume V, avremmo trovato

$$\frac{P V}{1 + \alpha T} = p_0 v_0.$$

Ciò significa che si ha:

$$\frac{p v}{1 + \alpha t} = costante. \qquad (7)$$

Questa relazione, che riassume in una sola formula le leggi di Boyle e di Gay-Lussac, è valida entro gli stessi limiti di approssimazione delle leggi medesime; e dicesi *equazione caratteristica dei gas ideali.*

Quantità di calore dei corpi.

37 — Contatto fra corpi a temperatura diversa. — Finora abbiamo parlato dei mutamenti termici di un corpo isolato, senza fermare la nostra attenzione sulle variazioni di temperatura subite contemporaneamente dagli altri corpi, coi quali esso si trovi eventualmente in contatto.

Ora, l' esperienza quotidiana ci insegna — come già accennammo (§ 1) — che *durante il contatto di più corpi,*

quando in nessuno di essi avvengano reazioni chimiche o mutamenti di stato, i corpi più caldi si raffreddano e quelli più freddi si riscaldano, e dopo un certo tempo tutti assumono la stessa temperatura.

38 — Calore. — In questo fatto, per analogia con altri fenomeni, siamo indotti a riconoscere i caratteri di un processo, nel quale *un qualche cosa* passa da un corpo ad un altro. E quindi — senza tuttavia attribuire all' espressione un vero significato fisico — per brevità di linguaggio, diremo che, quando un corpo si raffredda, *perde calore*, e che, quando si riscalda, *acquista calore*.

39 — Misura della quantità di calore. — Per vedere poi come si possa ottenere, nello studio dei fenomeni termici, la misura di ciò che abbiamo chiamato *calore*, supponiamo di portare una data quantità d' acqua, che sia a t°, dentro un recipiente contenente ghiaccio a 0°: allora la temperatura dell' acqua diminuisce fino a 0°, ed una certa quantità di ghiaccio si fonde. Usando il linguaggio che abbiamo adottato, concluderemo che l' acqua ha perduto una quantità q di calore, la quale ha prodotto la fusione di una quantità p di ghiaccio.

Se due corpi A e A' raffreddandosi sciolgono la stessa quantità p di ghiaccio, diremo che perdono la stessa qnantità q di calore; e se un corpo A fonde una quantità di ghiaccio doppia, tripla ecc. di quella fusa da un corpo A', diremo che A ha perduto una quantità di calore doppia, tripla, ecc., di quella perduta da A'.

Se poi un corpo viene riscaldato anzichè raffreddato, si conviene che la quantità di calore da esso acquistata per passare dalla temperatura t_1 più bassa, alla temperatura t più alta, sia uguale a quella che cederebbe per raffreddarsi da t° a $t_1{}^\circ$.

Dunque possiamo ridurre la misura di una quantità di calore alla determinazione della quantità di ghiaccio che essa è capace di sciogliere.

40 — Caloria. Calorimetro a ghiaccio. — Si è scelta perciò come *unità di misura* la quantità di calore che produce la fusione di un determinato peso di ghiaccio, senza farne variare la temperatura, e si è stabilito che tale peso sia $\frac{1}{79,2}$ di grammo, ossia circa $\frac{1}{80}$ di grammo.

Questa quantità di calore è stata chiamata *caloria*.

Così, quando si vuol fare la misura della quantità di calore ceduta da un corpo nel raffreddarsi fino a 0°, si chiude entro una cavità praticata in un blocco di ghiaccio (fig. 20), cioè nel *calorimetro a ghiaccio*, chiamandosi calorimetro ogni strumento che serve per la misura delle quantità di calore; e si raccoglie poi accuratamente l' acqua formatasi nella fusione. Il peso p di essa, moltiplicato per 79,2, esprime il numero di calorie cedute dal corpo.

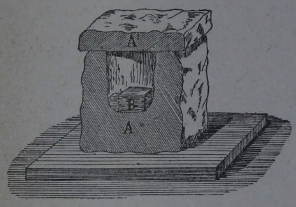


Fig. 20

La ragione della scelta di questa unità di calore è di indole puramente storica, poichè si convenne dapprima di prendere come unità *la quantità di calore necessaria per portare un grammo di acqua da 14° a 15°*: ora, con esperienze delicatissime si è trovato che tale quantità di calore fonde appunto gr. $\frac{1}{79,2}$ di ghiaccio, senza scaldarlo. Dunque, quando un grammo di acqua passa dalla temperatura di 14° a quella di 15° acquista una quantità di calore pari a quella necessaria per fondere gr. $\frac{1}{79,2}$ di ghiaccio senza farne variare la temperatura.

Si dà poi il nome di *grande caloria* ad una quantità di calore 1000 volte più grande, cioè a quella che determina la fusione di circa 12,5 grammi di ghiaccio.

41 — **Frigoria.** — In questi ultimi anni il rapido sviluppo preso dalle industrie frigorifere (fabbricazione del ghiaccio, costruzione di celle frigorifiche per la conservazione e il trasporto delle sostanze alimentari, ecc.) ha consigliato di parlare di *quantità di freddo*, così come si parla di quantità di calore, cioè di dire che un corpo acquista del freddo invece di dire che perde calore.

Nel congresso « sul freddo », tenutosi a Parigi verso la fine del 1908, gli scienziati stabilirono di prendere come unità di freddo la quantità uguale e contraria all' unità di calore; tale

unità, a cui fu dato il nome di *frigoria*, è dunque *la quantità di freddo necessaria per far congelare* $\frac{1}{79,2}$ *di grammo di acqua senza farne variare la temperatura*, od anche *la quantità di freddo necessaria per portare un grammo di acqua da 15° a 14°*.

Capacità termica e calore specifico.

42 — Quando un corpo viene portato da una temperatura t_1 ad una più alta t, acquista un certo numero di calorie: e si ammette che perda questo stesso numero di calorie, cioè che acquisti lo stesso numero di frigorie, quando viene raffreddato da t a t_1.

Per portare due corpi dalla temperatura t_1 alla temperatura t occorrono, in generale, quantità di calore differenti. Si esprime ciò dicendo che i due corpi possiedono *capacità termiche*, o *capacità calorifiche*, diverse; e si dice che ha capacità calorifica maggiore quello che richiede una quantità più grande di calore per subire cambiamenti di temperatura uguali a quelli subiti dall' altro.

L' esperienza prova che corpi di costituzione chimica identica hanno le capacità termiche proporzionali ai loro pesi: così 10 chilogrammi di ferro hanno una capacità termica 10 volte maggiore che un solo chilogrammo; e che corpi di ugual peso, ma di differente costituzione chimica, hanno capacità termiche diverse: così 1 chilogrammo di ferro ha capacità termica diversa da quella di 1 chilogrammo di piombo. Quindi la capacità termica di un corpo è conosciuta, quando se ne conosca il peso e la capacità termica dell' unità di peso. In conseguenza è stato assegnato un nome distinto alla *capacità termica dell' unità di peso* di una data sostanza per la variazione di temperatura di 1 grado: quello, cioè, di *calore specifico* della sostanza medesima.

Ma la capacità termica, e quindi il calore specifico, di un corpo, ha fra 0° e 1° valore diverso che fra 1° e 2°, che fra 2° e 3°, ecc.; perciò quando l' unità di peso di un corpo, passando dalla temperatura t_1 alla temperatura t, acquista q calorie, il valore $\frac{q}{t - t_1}$ dicesi il suo *calore specifico medio* fra le temperature t_1 e t. Se il corpo ha un peso p e

acquista Q calorie nel passare da t°_1 a t°, il calore specifico medio sarà dato da

$$c = \frac{1}{p} \frac{Q}{t - t_1}.$$

Il calorimetro a ghiaccio (§ 40), che dà direttamente la quantità di calore Q, può servire alla misura del calore specifico medio delle varie sostanze, fra determinate temperature.

43 — **Calorimetro di Bunsen.** — Per valutare la quantità di calore Q, si può utilizzare la fusione del ghiaccio anche in un' altra maniera: e cioè, deducendo la quantità di ghiaccio che si è fusa dalla diminuzione di volume che esso prova nel passaggio allo stato liquido. Su tale diminuzione di volume è basato il *calorimetro di Bunsen*.

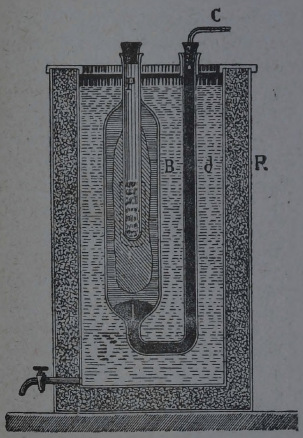


Fig. 21

Esso consta di una provetta di vetro P (fig. 21), saldata entro un grosso bulbo B, contenente dell'acqua bollita, al disopra di una massa di mercurio I. Questa occupa il fondo del bulbo e il tubo codato d, che gli è congiunto, e si spinge per un certo tratto in un lungo cannello orizzontale, C, diviso in parti uguali. L' apparecchio è protetto dalle cause esterne di riscaldamente da un vaso R, che contiene ghiaccio.

Si prepara l' esperienza facendo congelare in parte l' acqua nel bulbo per mezzo di una miscela frigorifera che si versa nella provetta P. Allora, intorno alle pareti della provetta si forma una camicia di ghiaccio; e poichè l' acqua congelando aumenta di volume, l' indice di mercurio avanza nel cannello C.

Quindi si toglie la miscela dalla provetta, e vi si introduce il corpo da studiare, riscaldato ad una temperatura t. Questo determina la fusione di una parte del ghiaccio formatosi sulle

pareti della provetta, e l' indice di mercurio retrocede nel cannello C, di un certo numero di divisioni. Ora, una preventiva graduazione dell' apparecchio ci dà la quantità q di calore che corrisponde al ritirarsi del mercurio per una sola divisione del cannello C; quindi basta moltiplicare q per il numero di divisioni di cui il menisco è indietreggiato nella nostra esperienza, per avere la quantità totale Q di calore che il corpo ha ceduto per raffreddarsi da $t°$ a $0°$.

Se tale corpo pesa p grammi, il suo calore specifico è dunque

$$c = \frac{Q}{pt}. \qquad (8)$$

Per fare la necessaria graduazione dell' apparecchio si introduce in P, invece del corpo in istudio, un peso g di acqua scaldata ad una certa temperatura θ; se il mercurio, pel raffreddamento di quest' acqua fino a $0°$, retrocede di n divisioni, allora — supponendo il cannello C ben calibro e ammettendo che sia costante ed uguale a 1 caloria il calore specifico dell' acqua fra $0°$ e $\theta°$ — vuol dire che ogni divisione del cannello corrisponde alla quantità di calore $\frac{g\,\theta}{n}$.

44 — Metodo delle mescolanze per la misura del calore specifico. — L' esperienza dimostra che il calore specifico dell' acqua si mantiene sensibilmente costante entro limiti abbastanza estesi comprendenti la temperatura ordinaria: perciò si possono misurare le quantità di calore che cedono i corpi raffreddandosi, e quindi i loro calori specifici, dal riscaldamento che esse producono in un noto peso d' acqua.

Questo metodo, molto comodo, consiste nel mescolare con un noto peso di acqua, a temperatura poco diversa da quella dell' ambiente, un peso conosciuto del corpo di cui si tratta, portato prima ad una temperatura ben determinata, e nel misurare la temperatura della mescolanza.

Il calorimetro che serve allo scopo, è costituito da un cilindro C di ottone a pareti ben lucide (fig. 22), sorretto da tre prismetti di sughero dentro un altro vaso speculare C', che protegge il primo dagli scambi di calore coll' esterno. Il vaso C contiene una certa quantità P di acqua, un termometro T, e un' asta a portante in basso una specie di anello (agitatore) che serve a rimescolare il liquido.

Per fare la determinazione, si prende un peso p del corpo in istudio, si porta ad una temperatura nota t, mediante una apposita stufa, e poi rapidamente si immerge nell' acqua del vaso calorimetrico. Questa si scalda a spese del calore del corpo,

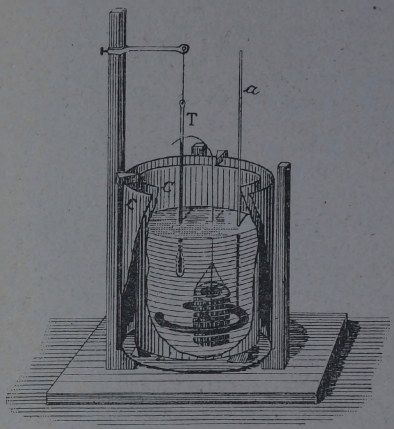


Fig. 22

ed il sistema, muovendo l' agitatore, raggiunge dopo poco tempo un' unica temperatura θ.

Se t' era la temperatura iniziale dell' acqua — potendosi ritenere uguale a uno il calore specifico dell' acqua — la quantità di calore che essa ha ricevuto dal corpo è espressa da

$$P\ (\theta - t').$$

D' altra parte la quantità di calore perduta dal corpo è

$$c.\ p.\ (t - \theta),$$

essendo c il suo calore specifico medio fra t e θ. Quindi eguagliando le due quantità, si ottiene

$$P\ (\theta - t') = c\ p\ (t - \theta),$$

da cui si ricava il calore specifico c cercato:

$$c = \frac{P\ (\theta - t')}{p\ (t - \theta)}. \qquad (9)$$

Il risultato così ottenuto sarebbe poco preciso, perchè non si è tenuto conto del calore somministrato al vaso calorimetrico, al termometro e all' agitatore; e si sono trascurati pure gli scambi di calore coll' esterno, che non si possono mai del tutto evitare. Di tali elementi disturbatori si fa però la valutazione nelle misure ove occorre una certa precisione.

45 — **Legge di Dulong e Petit.** — Il calore specifico dei corpi è in stretta relazione colla loro costituzione chimica. Infatti, Dulong e Petit, da numerose determinazioni di calori specifici, arrivarono a stabilire la legge che, *per i corpi solidi elementari, è costante il prodotto del calore specifico per il loro peso atomico.*

Ossia, per due corpi solidi elementari qualunque, i calori specifici stanno in ragione inversa dei pesi atomici.

Di tal legge si ha una prova sperimentale nella seguente esperienza.

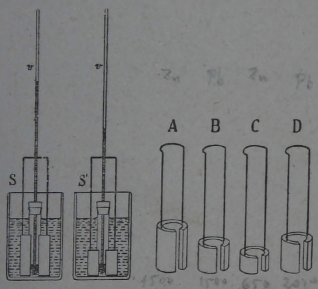


Fig. 23

Prendiamo due vasi di vetro S, S' (fig. 23), contenenti uguali quantità di acqua, e in essi immergiamo due uguali termometri ad aria, costituiti semplicemente da una provetta contenente un po' d' acqua colorata, in cui pesca un cannello di vetro v passante attraverso il tappo della provetta.

Prendiamo inoltre quattro lamine metalliche piegate a cilindro: due di zinco, A e C, dei pesi rispettivi di 1500 e 650 grammi, e due di piombo, B e D, che pesino rispettivamente 1500 e 2070 grammi.

Dopo aver riscaldato fino a 100° questi 4 pezzi metallici, tenendoli in un recipiente d' acqua che bolle, immergiamo i due di ugual peso, A e B, nei vasi S e S': vedremo salire il liquido nei termometri ad un' altezza diversa, perchè il calore specifico dello zinco differisce da quello del piombo.

Se invece, dopo aver cambiata l' acqua dei recipienti S e S', vi immergiamo gli altri due pezzi C e D, vedremo salire il liquido colorato fino ad una stessa altezza nei due tubi, perchè

appunto i due pesi sono stati scelti in ragione diretta dei pesi atomici dello zinco e del piombo.

La legge di Dulong e Petit non è che approssimata, poichè il calore specifico di un corpo non è costante, ma varia colla temperatura. Tuttavia questa legge può servire a ricavare con una certa approssimazione il peso atomico dei corpi semplici.

46 — **Calore specifico dell'acqua** — Abbiamo già osservato che il calore specifico dell'acqua risulta pressochè indipendente dalla temperatura. Uno studio più minuto dei fatti dimostra che, fra 0° e 100°, il calore specifico dell'acqua varia di 0,01.

Ora, l'unità di calore che si è scelta (quella capace di fondere $\frac{1}{79,2}$ di grammo di ghiaccio) è capace di elevare la temperatura d'un grammo d'acqua di un grado, o più precisamente da 14° a 15°. Dunque, con la scelta fatta per l'unità di calore, il calore specifico dell'acqua a 14° risulta uguale all'unità e differisce pochissimo dall'unità anche in un intervallo assai ampio di temperatura.

Se si confrontano i calori specifici medi tra 0° e 100° dei diversi corpi con quello dell'acqua, si vede che i primi sono assai più piccoli di questo. L'acqua richiede, dunque, per scaldarsi, una quantità di calore notevolmente più grande che non gli altri corpi nelle stesse condizioni.

Le numerose applicazioni dell'acqua e la sua funzione nei fenomeni naturali, dànno a questo fatto un'importanza capitale. Si utilizza l'acqua calda nei caloriferi, per esempio, perchè l'acqua, raffreddandosi, cede una quantità di calore molto più grande di quella che potrebbe cedere qualunque altro corpo a parità di massa. Le acque naturali, in contatto con l'atmosfera, compiono la funzione di regolatore della temperatura, cedendo molto calore quando quella tende ad abbassarsi e assorbendone al contrario quando tende ad innalzarsi.

Probabilmente il calore specifico varia con la temperatura in tutte le sostanze: in generale, esso cresce a mano a mano che la temperatura s'innalza.

Il calore specifico varia poi quando una sostanza cambia stato di aggregazione: un'idea di tale variazione si può avere dal seguente esempio.

Ghiaccio	Acqua	Vapor d'acqua (a press. cost.)
0,5	1,0	0,34

Trasmissione del calore.

Conduzione.

47 — Conducibilità assoluta. — È interessante ora il vedere secondo quali regole avvengono i passaggi del calore fra i vari corpi, o fra le varie parti di un corpo, che siano a differenti temperature.

A tal uopo, consideriamo un muro molto esteso le cui faccie MM', NN' (fig. 24) siano mantenute alle temperature costanti T e t, la prima maggiore della seconda. La temperatura in un punto qualunque S interno al muro prenderà dopo un certo tempo, un valore definitivo θ, ch'è compreso tra T e t e che si mantiene da allora in poi costante; e tutti i punti del piano PP', passante per S e parallelo alle faccie avranno la stessa temperatura θ.

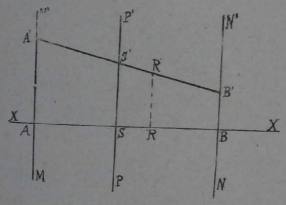


Fig. 24

Conduciamo ora la retta XX normale alle pareti, e su questa retta, in scala determinata, innalziamo le perpendicolari AA', SS', BB', rappresentanti le temperature T, θ, t: qualunque sia la sostanza di cui è costituito il muro, i punti A', S', B' sono in linea retta. Quindi la temperatura in un punto qualunque R sarà pure rappresentata dal segmento RR'.

Per quanto riguarda la quantità di calore Q che in un dato tempo passa dall'una all'altra parete, si prova che essa è proporzionale alla differenza delle temperature $T - t$, all'area di muro considerata, e al tempo. Così attraverso due metri quadrati di muro passa una quantità di calore doppia di quella che passa attraverso un solo metro quadrato. Per una data differenza di temperatura, la quantità di calore è tanto più piccola quanto è maggiore lo spessore del muro. Infine, a parità delle altre condizioni, questa quantità dipende dalla sostanza di cui è formato il muro. Perciò la quantità di calore Q che passa in τ secondi attraverso s centimetri quadrati di superficie di un muro dello

spessore di l centimetri, le cui pareti sian mantenute alle temperature costanti T e t, è data dalla formula

$$Q = k \frac{s\tau}{l} (T - t), \qquad (10)$$

dove k è un coefficiente che dipende dalla sostanza di cui è costituito il muro e che si chiama *conducibilità assoluta* di quella sostanza. Ecco, ad esempio, i valori di k per alcune sostanze:

Marmo	0,90	Rame	25
Piombo	4	Argento	40.

48 — **Conducibilità apparente.** — Nelle applicazioni della formula però bisogna andar cauti.

Prendiamo, infatti, due capsule d' argento della stessa forma e delle stesse dimensioni esterne, ma di spessore notevolmente diverso. Mettendo del ghiaccio in queste capsule e ponendo la loro superficie esterna in contatto con acqua bollente, noteremo che le quantità di ghiaccio disciolte son quasi identiche nei due casi, mentre secondo la legge suesposta dovrebbero essere a un dipresso inversamente proporzionali agli spessori.

Questa apparente contraddizione proviene dal fatto che per applicare la formula (10) occorrerebbe che le due pareti dell' argento fossero alle temperature T' e t' possedute dall' acqua e dal ghiaccio; ma invece si sa che effettivamente la parete più calda dell' argento ha una temperatura T più bassa di T', e la parete più fredda una temperatura t più alta di t', di modo che la differenza $T - t$ è minore di $T' - t'$; e perciò la quantità di calore Q, ponendo nella (10) $(T' - t')$ invece che $(T - t)$, riesce notevolmente più grande.

L' esperienza, infatti, dimostra che alla superficie di un metallo, in contatto di un gas o di un liquido, aderisce un esilissimo strato del gas o del liquido, in condizioni tutt' affatto speciali. Se volessimo sostituire questi due strati che aderiscono sulle due faccie di una lamina metallica, con due strati di ugual conducibilità formati dallo stesso metallo, questi due strati fittizi — essendo piccolissima la conducibilità dei gas e dei liquidi — verrebbero ad avere uno spessore enorme, in confronto del quale lo spessore della lamina effettiva sarebbe addirittura insignificante.

Si comprende dunque come lo spessore della lamina abbia minima influenza sul calore trasmesso, e questa influenza sia

tanto meno notevole quanto è maggiore la conducibilità della sostanza adoperata. La conducibilità di una lamina in queste condizioni dicesi *conducibilità apparente*, e può essere notevolmente aumentata strofinando le faccie della lamina e rinnovando continuamente i liquidi o i gas in contatto con esse.

49 — Applicazioni della conducibilità dei corpi. — La diversa conducibilità dei corpi ha svariatissime applicazioni, sia nella economia domestica, sia negli usi scientifici, sia in quelli industriali.

È infatti utilizzata, fin da epoca remotissima, la cattiva conducibilità dei panni di lana, per difenderci dal freddo. Così si suol munire di manichi di legno gli arnesi di cucina per evitare le scottature maneggiandoli; si sogliono rivestire di mattoni, cattivi conduttori, i camini e le stufe, per impedire che se ne propaghi il calore alle parti incendiabili dell' edificio.

Negli usi scientifici poi si ricorre al legno, alla mica, alla ebanite, quando si voglia impedire la conduzione del calore; si adopera invece l'argento e il rame quando si voglia facilitarla.

Fig. 25

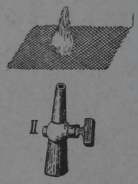


Fig. 26

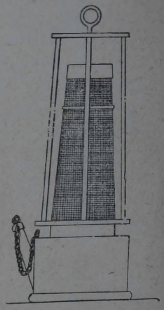


Fig. 27

Approfittando della buona conducibilità delle reti metalliche, si può anche isolare una fiamma in un ambiente, senza togliere la comunicazione coll' aria che l' alimenta.

Infatti, se poniamo una reticella di metallo sopra una fiamma a gas (fig. 25), vediamo che il gas non brucia al di sopra della rete, perchè il calore della fiamma sottostante, propagandosi nei fili metallici, non giunge dalla banda opposta in quantità bastante da mantenere incandescente il gas.

Mentre per altra parte, se accendiamo il gas che passa al disopra della reticella, esso seguita a bruciare senza che la fiamma si propaghi al di sotto (fig. 26).

Della proprietà delle reticelle trasse partito Davy per la costruzione della sua *lampada di sicurezza* (fig. 27), così detta perchè destinata ad impedire gli scoppi nelle miniere.

Essa non è che una lampada ordinaria, in cui la fiamma è circondata da una rete metallica. Entrando con essa in un ambiente, in cui si trovi una miscela di un gas infiammabile e di aria, si ha un piccolo scoppio nell' interno della lampada; ma la reticella impedisce al calore sviluppato di propagarsi all' esterno, e di rendere generale l' esplosione.

Irraggiamento.

50 — Se scaldiamo in una stufa un termometro che abbia il bulbo assai grande, e lo portiamo dentro un recipiente chiuso (fig. 28), la cui parete sia mantenuta a temperatura più bassa, per es. da uno strato di ghiaccio che la circondi, il termometro si raffredda, benchè non sia a contatto con nessun corpo conduttore. Il termometro in tal caso perde calore per *irraggiamento*, cioè emette calore come un corpo luminoso emette luce.

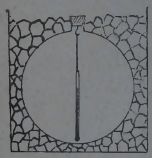


Fig. 28

L' intensità di questa emissione, e quindi la velocità colla quale il termometro si raffredda, dipende dallo strato superficiale del bulbo e dalla temperatura della parete del recipiente.

Per esempio, supponiamo che il termometro impieghi un minuto a passare da 50° a 40°: in questo periodo di tempo l' eccesso della temperatura del termometro su quella della parete del recipiente, che è a 0°, è passato da 50° a 40°, e potremo dire che ha conservato il valore medio di 45°.

Se invece misuriamo il tempo che impiega il termometro a passare da 27°,5 a 17°,5, troveremo due minuti, cioè un tempo doppio del precedente, e quindi a parità di tempo il termometro ha subito ora una perdita di calore metà che nel primo caso; e l' eccesso di temperatura è stato in media nel secondo caso di 22°,5, cioè precisamente metà che nel primo.

Dunque *la quantità di calore irraggiata in uno stesso tempo da un corpo, situato in una cavità chiusa, è proporzionale alla differenza delle temperature del corpo irraggiante e della superficie della cavità.*

Questa legge fu enunciata da Newton, e si può ritener vera finchè l' eccesso di temperatura del corpo su quella delle pareti della cavità non è troppo considerevole.

In secondo luogo l' esperienza dimostra che l' emissione dipende, come abbiamo accennato, dalla natura della superficie del termometro. Infatti, prendiamo due termometri identici per forma e per dimensioni, e ricopriamo il bulbo di un d' essi con uno strato sottilissimo e brillante d' argento, e quello dell'altro con nerofumo. Troveremo che il raffreddamento del secondo è molto più rapido di quello del primo.

51 — Distribuzione della temperatura in una sbarra. — L' irraggiamento del calore ci spiega perchè la distribuzione della temperatura in una sbarra, riscaldata ad un estremo, non segua la stessa legge che si ha in un muro indefinito.

Per investigare una tale distribuzione, collochiamo orizzontalmente una sbarra di ferro AB (fig. 29), scaldiamone l'estremo

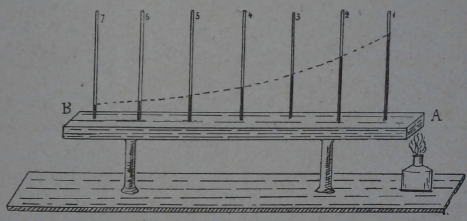


Fig. 29

A mediante una lampada, e misuriamo la temperatura di punti successivi mediante una serie di termometri 1, 2, 3, 4, ecc., identici, coi bulbi pescanti entro pozzetti, pieni di mercurio, praticati nella sbarra. Dopo un certo tempo le colonne termometriche cessano di innalzarsi, e allora si nota che le loro estremità sono situate sopra una linea curva, mostrata dalla figura.

Invece, se la distribuzione delle temperature seguisse la legge che vale per un muro indefinito, quella linea dovrebbe essere, come sappiamo, una retta.

Ma in un muro indefinito il calore, che in un dato tempo entra per una delle facce, si trasmette per intero all'altra faccia non essendovi perdite laterali. Nella sbarra, invece, la superficie laterale emette calore per irraggiamento; e quindi non tutto il calore che arriva alla sezione A si trasmette alla sezione B, e perciò il decremento della temperatura col crescere

della distanza dall' estremo scaldato, deve essere dapprima rapido, poi sempre più lento, perchè la perdita per irraggiamento diminuisce col diminuire dell' eccesso della temperatura su quella dell' ambiente.

52 — **Assorbimento del calore.** — Come un corpo, portato in un ambiente più freddo, emette calore per irraggiamento, così un corpo, mantenuto in un ambiente più caldo, *assorbe* calore, anche se isolato.

Non tutti i corpi però assorbono calore egualmente: ad esempio, ponendo davanti ad uno stesso corpo caldo un termometro annerito con nerofumo, ed uno argentato, il primo si riscalda più presto del secondo. Questa esperienza, posta in confronto con quella del § 50, dimostra come i corpi che emettono facilmente calore, facilmente lo assorbono: esperienze più precise provano poi come l' emissione sia proporzionale all' assorbimento.

Ma non si può dire questo in modo assoluto per il calore raggiante emesso in qualunque condizione; giacchè del calore raggiante si hanno diverse gradazioni secondo la temperatura del corpo che lo emette, come si hanno, nei vari colori, diverse gradazioni della luce.

Perciò, il confronto dell' assorbimento e dell' emissione di due corpi deve essere fatto pel calore raggiante di una data gradazione; e si può dire soltanto che un corpo emette e assorbe meglio di un altro il calore di una data sorta.

Così il nerofumo e il borato di piombo assorbono egualmente bene il calore emesso da un corpo a 100 gradi; mentre che l' assorbimento del borato è solo $\frac{3}{4}$ di quello del nerofumo pel calore raggiante emesso a 550°: e similmente si trova che, mentre l' emissione del borato e del nerofumo sono le stesse a 100°, invece a 550° quella del borato è solo $\frac{3}{4}$ di quella del nerofumo.

Senza dilungarci di più, ci contenteremo di enunciare la legge generale: *un corpo è capace di assorbire ogni gradazione di calore raggiante che emette; e l' assorbe in misura tanto maggiore, quanto è maggiore l' intensità colla quale la emette.*

Convezione.

53 — Il calore può propagarsi, oltre che per conduzione e per irraggiamento, anche in un altro modo, detto per *convezione*.

Se si riscalda un liquido o un gas in un punto qualunque della sua massa, ivi la densità diminuisce, e la porzione scaldata va in conseguenza ad occupare una parte più alta nel fluido, portandovi con sè una certa quantità di calore.

In tal modo, ad esempio, si trasmette al soffitto il calore di un fornello posto in una stanza. Le parti dell' aria, che vengono in contatto coi carboni, si scaldano, e diminuendo di densità salgono in alto, finchè giunte in contatto del soffitto gli cedono parte del loro calore.

L' ascesa delle parti scaldatesi determina una discesa di quelle meno calde, le quali vanno ad occupare il posto delle prime; e si formano così due correnti: una, più calda, ascendente, e una, meno calda, discendente.

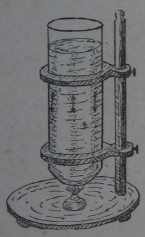


Fig. 30

Si vede questo facilmente scaldando con una lampada un vaso d' acqua (fig. 30), in cui sia stata posta in sospensione della minuta segatura di legno.

Nella parte centrale del vaso la segatura si muove dal fondo verso l' alto, trascinata dalla corrente ascensionale, mentre lungo le pareti si muove dall' alto al basso, trascinata dalla corrente discendente.

Mutamenti di stato.

Fusione.

54 — Quasi tutte le sostanze solide, quali il vetro, la cera, il fosforo, i metalli, divengono liquide quando sono portate ad una temperatura sufficientemente elevata; si dice allora che esse fondono, e al fenomeno si dà il nome di *fusione*.

Inversamente esse ritornano allo stato solido, se si fanno raffreddare; e al pari di esse, tutti i corpi che alla temperatura ordinaria sono liquidi, solidificano se vengono sufficiente-

mente raffreddati, e ritornano liquidi se sono sufficientemente riscaldati.

Tutti i liquidi possono essere solidificati senza che la loro costituzione chimica sia alterata, mentre non tutti i solidi possono essere fusi. Prendiamo, ad esempio, un pezzo di legno, e scaldiamolo in un vaso chiuso per evitare il contatto dell'aria. Vedremo che il legno non fonde, ma che ad una data temperatura si decompone, dando luogo a del carbone e a sostanze liquide e gassose diverse dal legno. Quasi tutte le sostanze vegetali e animali si comportano come il legno, cioè si decompongono invece di fondere.

55 — **Fusione pastosa e fusione brusca.** — La fusione non si manifesta per tutti i corpi nello stesso modo. Certi corpi, come il vetro, la ceralacca, la guttaperca, che *non cristallizzano*, attraversano, prima di passare allo stato di fluidità completa, stadî di diversa pastosità, rammollendosi gradualmente e assumendo l'apparenza di liquidi più o meno vischiosi. La fusione allora si dice *pastosa*.

Però nessuna sostanza chimicamente definita, che allo stato solido si presenti sempre cristallizzata, compie il passaggio allo stato liquido per gradi. Tale passaggio in queste sostanze avviene sempre in modo brusco, cioè esse non presentano stati intermedi fra il solido e il liquido. La fusione allora dicesi *brusca*.

56 — **Punto di fusione.** — Ma esistono tuttavia dei corpi cristallini che non si sono lasciati ridurre allo stato liquido, quali il Wolframio, il Boro e il Molibdeno, che sono rimasti ancora refrattarî alle temperature raggiunte fin qui.

Gli altri corpi, che trovansi allo stato cristallino, fondono a una determinata temperatura più o meno elevata, secondo un processo ch'è lo stesso per tutti. Un pezzo di ghiaccio, ad es., rimane solido alla pressione ordinaria, finchè non abbia raggiunto la temperatura che è stata indicata con 0° nelle scale centigrada e del Réaumur. A questa temperatura, sotto l'azione del calore, comincia a sciogliersi senza passare per lo stato plastico. Somministrandogli nuovo calore, si forma dell'altro liquido, ma la temperatura resta costante finchè non siasi fuso tutto.

L'esperienza dimostra che tutte le sostanze a fusione brusca si comportano analogamente al ghiaccio, fondendo ciascuna

a una propria temperatura determinata che rimane costante per tutta la durata della fusione. Quindi possiamo concludere che:

1°) *Sotto una data pressione una sostanza chimicamente definita fonde ad una temperatura determinata, diversa da sostanza a sostanza.*

2°) *Tale temperatura non varia, fintantochè il corpo non sia interamente fuso.*

Questa temperatura costante, alla quale si inizia e si compie il fenomeno della fusione dei corpi cristallini, si chiama *punto di fusione.*

Nella tabella seguente sono indicati, in gradi centesimali, i punti di fusione di alcune sostanze:

Mercurio . .	— 39°	Piombo . .	334°
Ghiaccio . .	0°	Oro . .	1035°
Zolfo . . .	110°	Ferro . .	1600°

57 — Solidificazione. — Punto di solidificazione. — Se, viceversa, prendiamo dell'acqua e la raffreddiamo gradatamente, tenendola in movimento per mezzo di un agitatore, la sua temperatura va abbassandosi finchè sia giunta a 0°. Allora cominciano a formarsi in seno al liquido piccoli cristalli di ghiaccio, che vanno a mano a mano ingrandendosi, fino a che tutta l'acqua non siasi solidificata; e intanto la temperatura della miscela acqua-ghiaccio resta a 0°, sebbene la temperatura esterna sia inferiore. Soltanto dopo che la solidificazione è completa, la temperatura del ghiaccio si abbassa.

Analogamente succede per qualsiasi altro corpo, che passi dallo stato liquido allo stato solido in modo brusco; e la temperatura — costante per ogni sostanza — alla quale si inizia e si compie il fenomeno, si chiama *punto di solidificazione* (e, nel caso dell'acqua, più spesso *punto di congelazione*).

Se ne deduce che:

1° *Ogni sostanza che passi dallo stato liquido allo stato solido in modo brusco, sotto una data pressione, comincia a solidificarsi ad una temperatura determinata e diversa per le diverse sostanze.*

2° *Tale temperatura si mantiene inalterata, fino a che tutto il corpo non sia solidificato.*

A queste due leggi ne possiamo aggiungere un'altra che lega il punto di fusione e di solidificazione:

Sotto una data pressione, per una data sostanza a fusione brusca, il punto di fusione e di solidificazione coincidono.

Così l'acqua fonde a 0° e solidifica a 0°; il mercurio fonde a —39° e solidifica a —39°.

58 — Calore di fusione. — Durante la fusione di un corpo, come abbiamo già veduto, il calore che ad esso viene somministrato, finchè non sia tutto convertito in liquido, non serve ad elevarne la temperatura. A tale quantità di calore — costante per un determinato peso di un corpo — fu dato perciò il nome di *calore di fusione*.

E più precisamente si dice *calore di fusione* di una data sostanza, *la quantità di calore necessaria per fondere un grammo della sostanza, preso alla sua temperatura di fusione.*

Si può misurare il calore di fusione con uno dei metodi usati per la determinazione del calore specifico, ad esempio col metodo delle mescolanze, ammettendo che nella solidificazione si svolga una quantità di calore uguale a quella somministrata al corpo nella fusione.

Sia σ il calore specifico della sostanza allo stato solido, σ' il calore specifico allo stato liquido ed L il suo calore di fusione.

Portiamo n grammi della sostanza a t gradi sopra il punto di fusione, e poniamola indi nel calorimetro, ove si raffredderà fino a t' gradi al disotto dello stesso punto.

Il calore ceduto sarà:

$$n\,(\sigma t + L + \sigma' t') = Q.$$

Ora, Q è dato direttamente dal calorimetro, σ e σ' sono già noti; dunque nell'equazione tutto è conosciuto all'infuori di L, che si può quindi calcolare.

59 — Soprafusione. — Se invece di agitare l'acqua mentre va raffreddandosi, lasciamo che essa resti tranquilla, la temperatura si abbassa fino anche a 3° o 4° sotto lo zero, senza che si formi nell'acqua il più piccolo cristallo di ghiaccio. Ciò può vedersi facilmente lasciando per qualche tempo un bicchiere d'acqua entro un vaso circondato da una mescolanza di ghiaccio e sale, oppure lasciando il bicchiere sul davanzale di una finestra, in una tranquilla notte d'inverno. In questo caso, al

mattino, l'acqua può trovarsi ancora liquida, sebbene la temperatura sia di qualche grado inferiore allo zero.

Ove poi l'acqua venga coperta con un sottile strato di olio, il fenomeno si produce anche più facilmente, e la temperatura può essere abbassata fino a —8° o —10°, senza che avvenga la congelazione.

In questo stato l'acqua dicesi *soprafusa*.

Scuotendo in queste condizioni l'acqua, improvvisamente si formano numerosi cristalli, cioè principia la congelazione: un termometro immerso nell'acqua ci farà vedere che *la temperatura sale a 0°*, ed ivi resta costante finchè tutta l'acqua siasi congelata.

Oltrechè con l'agitazione del liquido, si può far cessare — e con maggiore sicurezza — la soprafusione, gettando nel liquido stesso un piccolo cristallo di ghiaccio. Intorno a questo, come nucleo, principia subito il congelamento, e la temperatura sale a 0°.

Fenomeni simili si presentano anche nella solidificazione di altri corpi, specialmente dello zolfo e del fosforo.

Pel fosforo possiamo provarlo colla seguente esperienza.

Un grosso pezzo di fosforo è posto sott'acqua, in un bicchiere in cui è immerso anche il bulbo di un termometro (fig. 31).

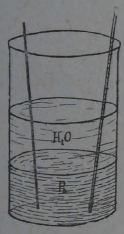


Fig. 31

Si scalda lentamente il bicchiere fino a che il fosforo cominci a fondere: il termometro allora segnerà la temperatura di 44°,2. Quando tutto il fosforo sia fuso, facciamo raffreddare il vaso lasciandolo tranquillo. Vedremo che il fosforo resta liquido, benchè il termometro segni una temperatura molto più bassa di 44°,2.

Però se immergiamo nel vaso una bacchetta di vetro intrisa di fosforo, l'intera massa del fosforo fuso repentinamente solidifica, mentre la temperatura sale precisamente a 44°,2.

Questo fatto conferma, inoltre, come in ogni caso il punto di solidificazione e di fusione coincidano.

60 — Variazione di volume nella fusione. — Nel passaggio dallo stato solido allo stato liquido, i corpi cambiano di volume; e a proposito del calorimetro di Bunsen abbiamo già visto come il ghiaccio, fondendo, diminuisca di volume. Un

chilo di ghiaccio, a 0°, occupa un volume di cm³ 1090,5, e fondendo dà luogo a un chilo d'acqua, che a 0°, occupa cm³ 1000,1 e a 100°, cm³ 1043,1: la densità del ghiaccio a 0° è dunque inferiore a quella dell'acqua, anche bollente, e per questo il ghiaccio galleggia sempre sull'acqua.

Come il ghiaccio si comportano il bismuto, l'argento, la ghisa; essi, cioè, *diminuiscono di volume nella fusione.*

Al contrario, fondendo dello zolfo, del fosforo, si vedono i pezzetti solidi calare a fondo nel liquido; e ciò prova che, per queste sostanze, il liquido ha minore densità, e perciò maggior volume, del solido. La maggior parte delle sostanze si comportano come queste, cioè *aumentano di volume nella fusione.*

61 — **Variazione del punto di fusione colla pressione.** — I punti di fusione che abbiamo riferiti al § 56, sono stati determinati allorchè i corpi rispettivi si trovavano sotto la pressione atmosferica; ma a pressioni notevolmente diverse da questa, sono differenti da quelli indicati.

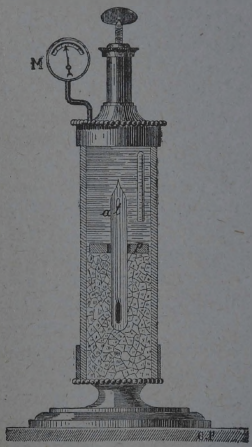


Fig. 32

La variazione del punto di fusione colla pressione non è grande e per il ghiaccio può essere mostrata nel modo seguente. Riempiamo d'acqua e di ghiaccio un vaso di vetro a pareti robuste (fig. 32), munito di uno stantuffo a vite, che permetta di esercitare pressioni considerevoli, e di un manometro metallico *M* che permetta di misurarle; e introduciamo nel vaso un termometro sensibile *t*, chiuso entro un tubo di vetro, *a*, per evitare gli effetti della compressione sul bulbo. Per lasciar vedere la graduazione del termometro, il ghiaccio può essere tenuto al basso mediante un disco di piombo, *p*. Quando il manometro indica che nell'interno la pressione è di 1 atmosfera vedremo il termometro fermo a 0°; quando la pressione è di 20 atmosfere, la temperatura è stazionaria a 0°,45, e parimente a 40 atmosfere e a 150 atmosfere, la temperatura si mantiene a —0°,3 e a —1° rispettivamente.

Se ripetiamo l'esperienza con la benzina, che alla pressione ordinaria fonde a 5°,6, troviamo che sotto 20 e sotto 300 atmosfere fonde rispettivamente a 6°,18 e a 14°,3.

L'acqua e la benzina si comportano dunque in modo affatto diverso: per la prima un aumento di pressione abbassa il punto di fusione, per l'altra lo innalza.

In generale si trova che, *per le sostanze le quali (come il ghiaccio) fondendo diminuiscono di volume, le compressioni abbassano il punto di fusione; per le altre sostanze invece, che (come la benzina) aumentano di volume fondendo, le compressioni innalzano il punto di fusione.*

62 — **Rigelo.** — All'abbassamento del punto di fusione del ghiaccio per effetto della compressione sono dovuti fenomeni interessanti, fra cui va notato quello del *rigelo*. Se si premono, l'un contro l'altro, diversi pezzi di ghiaccio a 0°, essi si saldano insieme. Ciò può facilmente mostrarsi riempiendo di pezzetti di ghiaccio un robusto tubo di ferro, e premendovi sopra uno stantuffo a colpi di martello. Capovolgendo poi il tubo in un vaso di acqua calda, se ne vede uscire un cilindro di ghiaccio compatto.

È facile dare la spiegazione del fenomeno. Infatti, siccome l'aumento di pressione fa abbassare al disotto di 0° il punto di fusione del ghiaccio, i varî pezzi di questo dovranno superficialmente disgelarsi nei punti premuti, perchè a 0° sono ad una temperatura superiore a quella della loro liquefazione; l'acqua risultante sfugge quindi fra gl'interstizî dei molteplici pezzetti, dove non essendo più sottoposta a pressione, *rigela*.

Al fenomeno del rigelo è stato attribuito il movimento dei ghiacciai. Sotto le enormi pressioni determinate dalla massa del ghiacciaio, il ghiaccio in basso fonde e si screpola e può così avvenire un lieve scorrimento. L'acqua fusa, non essendo più soggetta a pressione, rigela nelle screpolature, mantenendo la compattezza del ghiacciaio.

Soluzione.

63 — Oltre che per effetto della fusione, possiamo avere il passaggio allo stato liquido di alcuni solidi per altra via. Sappiamo, infatti, che esistono sostanze le quali, agitate nell'acqua o in altro liquido, si sciolgono nel liquido stesso, cioè dànno

luogo ad una mescolanza omogenea, che chiamasi *soluzione*. La sostanza, che prima era solida, è così divenuta liquida.

La soluzione di un solido presenta quindi analogia colla fusione.

64 — **Soluzioni sature.** — Se in un liquido (il solvente) mettiamo, *a temperatura costante*, quantità crescenti di un solido (il soluto), si osserva che la soluzione non può contenere più di una certa quantità di soluto per ogni determinato peso del solvente. Se il soluto è in quantità maggiore, l'eccesso resta allo stato solido in presenza della soluzione, che dicesi *satura*.

Facendo l'esperienza a temperature diverse, si trova che la quantità di soluto, necessaria a raggiungere la saturazione, varia colla temperatura e, in generale, aumenta con questa.

65 — **Soluzioni non sature e soprasature.** — Se una soluzione, ad una determinata temperatura, non contiene tutto il soluto necessario per raggiungere la saturazione, dicesi *non satura*.

In generale però raffreddando via via una tale soluzione, arriveremo a una temperatura, a cui — per quanto abbiamo detto poco fa — la soluzione sarà satura con quella quantità di solido; e raffreddando ancora vedremo parte del soluto separarsi allo stato solido.

Così, per es., una soluzione che contenga in un litro di acqua 423 gr. di solfato di rame, è non satura a 50°, ma se noi la raffreddiamo gradatamente, giunta a 20°, la soluzione diviene satura, e raffreddandola ancora deposita del solfato in fondo al recipiente.

Tuttavia, abbassando la temperatura con certe precauzioni, nell'assoluta tranquillità del liquido, possiamo oltrepassare questo limite, senza che la soluzione di solfato di rame metta in libertà del sale. Allora la soluzione si dice *soprasatura*.

Lo stesso può avverarsi per altre soluzioni, cioè si può abbassare la temperatura al di sotto del limite a cui esse sono sature, senza che si separi il soluto.

Questo fenomeno, detto *soprasaturazione*, è analogo alla soprafusione; e come in questa, basta il menomo urto, o l'introduzione di un pezzettino del solido disciolto, perchè la quantità di soluto eccedente si separi allo stato solido.

66 — **Calore di soluzione.** — L'analogia fra soluzione e fusione diviene più manifesta, quando si pensi che, come i solidi assorbono calore nel fondersi, così vi è assorbimento di calore quando un solido si scioglie.

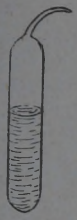


Fig. 33

Difatti quando si effettua la soluzione di un sale (per esempio sale ammoniaco nell' acqua) senza somministrare calore, la soluzione si raffredda; e inversamente, la separazione del soluto allo stato solido dà luogo a sviluppo di calore.

Si può provarlo facilmente ponendo in un tubetto di vetro, terminato a punta (fig. 33), una soluzione calda di acetato di piombo al 50 %, e poi chiudendo la punta alla fiamma. Lasciando raffreddare la soluzione fino alla temperatura ordinaria, essa rimane soprasatura entro il tubo. Se allora rompiamo la punta di vetro, il sale improvvisamente cristallizza, e si svolge tanto calore da rendere il tubo caldissimo al tatto.

Questo calore, che si svolge nella separazione del soluto, è uguale al calore assorbito nella soluzione.

67 — **Punto di congelamento delle soluzioni.** — Prendiamo ora una soluzione poco concentrata di un sale nell' acqua, e raffreddiamola progressivamente a poco a poco col gettare di quando in quando un pezzetto di ghiaccio nel liquido. Noteremo che, anche quando la temperatura della soluzione siasi abbassata fino a 0°, i frammenti di ghiaccio si sciolgono ancora. Ma raggiunta una temperatura sotto 0° i pezzetti di ghiaccio non si fondono più, e seguitando a raffredare la soluzione giunge un momento in cui tutta la massa solidifica. *Le soluzioni dunque in generale solidificano ad un punto più basso che non il solvente puro.*

Ora, l'abbassamento del punto di congelazione, per un dato peso di un dato solvente, è proporzionale al peso della sostanza disciolta, e diverso per pesi uguali di diversi soluti: ma è *identico per tutte le soluzioni che, a parità di peso di solvente, contengono un egual numero di grammi-molecole del soluto.*

Su questa legge, enunciata dal Raoult, è fondato il *metodo crioscopico* per la determinazione dei pesi molecolari.

68 — **Mescolanze refrigeranti.** — Da quanto abbiamo detto si può prevedere che, se mescoliamo del ghiaccio finamente

pestato con un sale, il ghiaccio deve fondersi. Infatti, la soluzione che si ottiene sciogliendo il sale nell' acqua ha il suo punto di congelamento al di sotto di zero gradi; quindi la miscela di sale e ghiaccio a 0° si trova a temperatura superiore a quella di solidificazione, e perciò si scioglie. Si produce allora un notevole abbassamento di temperatura — variabile con la proporzione del sale — essendovi assorbimento di calore per due ragioni: perchè il ghiaccio fonde, e perchè il sale si scioglie.

Miscele cosiffatte di ghiaccio con un sale diconsi *miscele frigorifere*, e sono usate per ottenere temperature al di sotto di zero gradi.

Sono molto adoperate quelle costituite:

a) da *tre* parti di ghiaccio e *una* di salmarino, con la quale si raggiunge la temperatura di —22°;

b) da *tre* parti di ghiaccio e *due* di cloruro di calcio, che arriva a —51°;

c) da parti uguali di ghiaccio e di acido solforico al 66,2 %, che giunge alla temperatura di —33°.

Evaporazione.

69 — **Evaporazione nel vuoto.** — I corpi, per effetto del riscaldamento, possono passare non solo dallo stato solido allo stato liquido, ma anche dallo stato liquido allo stato aeriforme. L' aeriforme, in cui si cangia così il liquido, si chiama *vapore*, e il passaggio si dice *evaporazione* (o *vaporizzazione*).

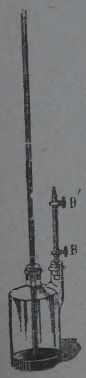


Fig. 34

Cominciamo, per semplicità, a studiare il caso in cui questo passaggio si compie in un ambiente privo d' aria.

Adoperiamo a tal uopo una bottiglia a due colli (fig. 34), nell' uno dei quali penetra una canna torricelliana, e nell' altro è innestato un breve cannello, munito di due rubinetti, *R*, *R'*. Facendo il vuoto nella bottiglia, il mercurio scende nell'interno della canna torricelliana, sino quasi al livello del mercurio esterno. Allora introduciamo tra i due rubinetti un po' di etere solforico, e, aprendo quello inferiore, qualche goccia di esso si converte subito in vapore, il quale esercita una pressione indicata dall' innalzamento del mercurio nella canna torricelliana.

70 — Vapori non saturi e vapori saturi. — Continuiamo di poi a far cadere successivamente delle goccie d' etere nella bottiglia: si ha ogni volta nuova formazione di vapore e si vede via via crescere la pressione da esso esercitata. Finchè ciò accade, si dice che il vapore contenuto nella bottiglia è *non saturo*.

Ma continuando ancora, ad un certo punto il processo di vaporizzazione si arresta: l' etere rimane liquido sulla superficie del mercurio, e l' altezza della colonna nella canna torricelliana rimane costante. Si dice allora che da quel punto in poi il vapore contenuto entro la bottiglia è *saturo;* e la pressione che esso esercita dicesi *tensione del vapor saturo* o *tensione massima del vapore*.

Tutti i vapori, quando si trovano in un ambiente chiuso in presenza del loro liquido, sono saturi.

71 — Indipendenza della tensione del vapor saturo dal volume. — Facciamo ora variare il volume occupato dal vapore, e per questo usiamo una canna torricelliana capovolta in un pozzetto profondo (fig. 35).

Fig. 35

Tenendo sollevata la canna, introduciamo nella sua bocca l' estremità ricurva di una pipetta contenente dell' etere, e facciamo in modo che un po' di liquido esca: questo sale nel mercurio della canna, e appena giunto nello spazio torricelliano, immediatamente si converte in vapore, che fa abbassare il mercurio nella canna sino ad un' altezza h contata dalla superficie del mercurio nel pozzetto. La differenza

$$p - h,$$

dove p è la pressione atmosferica indicata da un barometro di confronto, dà il valore della tensione del vapore. Se adesso affondiamo o solleviamo la canna nel pozzetto, sino a quando nella canna vi è etere liquido, vediamo che l' altezza h si mantiene costante, sebbene il volume varii notevolmente; dunque *la tensione del vapore saturo è indipendente dal volume che esso occupa*.

Quando questo volume cresce, una porzione di liquido che è in presenza del vapore evapora, quando diminuisce una porzione di vapore torna allo stato liquido.

Quando il vapore non è in presenza del suo liquido, può darsi che esso non sia saturo. Il vapore non saturo si comporta approssimativamente come i gas; cioè, *la sua tensione varia in ragione inversa del volume.*

72 — **Influenza della natura del liquido sulla tensione del vapore.** — La tensione del vapor saturo dipende dalla natura del liquido. Se noi prendiamo infatti tre tubi torricelliani (fig. 36), uno dei quali serva per confronto, e gli altri due contengano, nella parte superiore, rispettivamente vapor d' acqua e vapor d' etere (ciascuno in presenza del suo liquido), osserveremo, a temperatura ordinaria, un abbassamento di livello di circa 2 cm. nel tubo contenente l' acqua, e di circa 33 cm. in quello coll' etere.

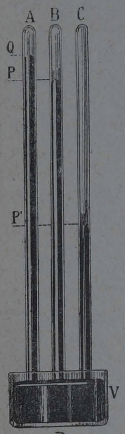


Fig. 36

Le tensioni massime del vapor d' acqua e del vapore di etere a 20° sono rispettivamente di 1,7 cm. e 33 cm.

73 — **Influenza della temperatura sulla tensione del vapore saturo.** — La tensione di tutti i vapori saturi aumenta col crescere della temperatura. Ciò si può facilmente vedere, ponendo in un bagno d' acqua la bottiglia dell' apparecchio adoperato al § 69 (fig. 34) e scaldando il bagno: a mano a mano che la temperatura del bagno cresce, s' innalza la colonna di mercurio nella canna.

Ma non v' è proporzionalità tra gli aumenti di temperatura e gli aumenti di tensione; lo dimostrano i seguenti numeri, che esprimono in altezze di mercurio le tensioni del vapor d' acqua a diverse temperature.

temperatura	0°	10°	20°	100°	150°	200°
tensione in cm.	0,46	0,91	1,74	76	358	1169

74 — **Tensione massima del vapore d' acqua a 100°.** — Questa tabella ci mostra che la tensione del vapor d' acqua a 100° è esattamente di 1 atmosfera. Ciò è importante per le applicazioni che dovremo farne in seguito, e si può dimostrare facilmente col seguente apparecchio.

In un tubo ad U (fig. 37) — di cui la branca più corta, AB, è chiusa, e la più lunga aperta — è stato versato del mercurio, in modo da riempire totalmente il ramo AB, quindi un po' di acqua, che è stata fatta passare sopra il mercurio di questo ramo. Il tubo è immerso, insieme con un termometro T, in una provetta piena d' acqua, posta sulla fiamma di una lampada Bunsen. Man mano che l' acqua si riscalda, il mercurio scende in AB e sale in BC, e quando l' acqua bolle, esso arriva allo stesso livello nei due rami. Ciò indica che, alla temperatura di ebollizione dell' acqua, la tensione del suo vapore saturo è uguale alla pressione esterna. Se questa pressione sarà di 76 cm., il termometro segnerà 100°: dunque la tensione del vapor d' acqua saturo alla temperatura di 100° è di 1 atmosfera.

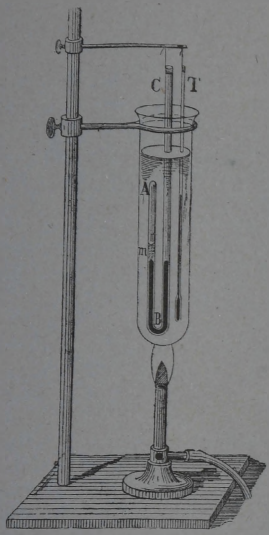


Fig. 37

75 — Influenza della temperatura sulla quantità del vapore saturo in un dato spazio. — Come aumenta, col crescere della temperatura, la tensione del vapore saturo, aumenta, in un determinato ambiente chiuso, la quantità di vapore. Difatti, se riscaldiamo un tubetto di vetro chiuso, contenente poche gocce di etere (fig. 38), vediamo che diminuisce sempre più la quantità di liquido, e che, raffreddandolo, una parte del vapore riprende lo stato liquido primitivo.

Fig. 38

76 — Confronto fra la densità del liquido e la densità assoluta del suo vapore. — Ricordando, ora, che la *densità assoluta* (Vol. 1, § 202) di un aeriforme, che occupa un dato volume, è proporzionale al suo peso, risulta, da quanto abbiamo visto nel paragrafo precedente, che al crescere della temperatura cresce pure la densità *assoluta* di un vapore saturo, mentre sappiamo (§ 25)

che diminuisce la densità del suo liquido. Il modo in cui avvengono tali variazioni di densità, si può vedere portando su un asse di coordinate (fig. 39) le temperature, a partire, ad es., da 0°, e sull' altro asse i valori delle corrispondenti densità del liquido e del vapor saturo. Si ottengono così due curve, una, AB, che rappresenta l'andamento della densità del vapore col crescer della temperatura, l' altra, CD, che rappresenta l' andamento della densità del liquido.

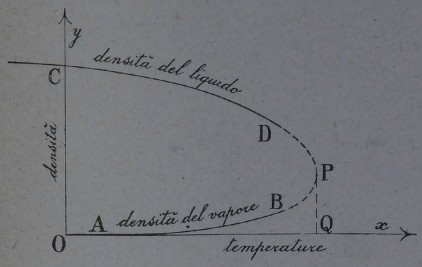


Fig. 39

La prima curva sta tutta al di sotto della seconda, e ambedue tendono a raccordarsi in un punto P, ed a formare approssimatamente una parabola APC: il punto di riunione P ha un' ordinata PQ, che è circa un terzo della massima ordinata del ramo CD.

Possiamo dunque dire che, *col crescere della temperatura, la densità assoluta del vapore saturo e la densità del liquido tendono verso un unico valore, che è circa un terzo del valore della densità massima del liquido* (legge del terzo delle densità).

77 — **Misura della densità dei vapori.** — Abbiamo già detto che, per la densità *relativa* degli aeriformi (Vol. I, § 205), torna comodo riferirci all' aria oppure all' idrogeno, presi nelle stesse condizioni di temperatura e di pressione.

Fig. 40

Per trovare la densità relativa dei vapori, si hanno dei metodi appositi, di cui uno dei più esatti è dovuto al Dumas.

Si pesa accuratamente un pallone di vetro sottile (fig. 40), avente il collo piegato ed affilato; poi vi si introduce un poco della sostanza di cui si cerca la densità di vapore, e si scalda, in un bagno di acqua o di olio, ad una

temperatura un po' superiore al suo punto di ebollizione. Quando il vapore formatosi ha scacciato tutta l'aria dal pallone, e tutto il liquido è evaporato, si chiude la punta con un colpo di fiamma, e si misura la temperatura del bagno e la pressione atmosferica in quel momento. Si pesa allora di nuovo il pallone.

Fatto ciò, si rompe la punta, mentre è immersa in una vasca di mercurio; il vapore si condensa, e il mercurio va a riempire tutto il pallone. Si pesa infine il pallone pieno di mercurio: sottraendo questo peso dal primo, si ha il peso del mercurio e quindi il volume del recipiente; con questo poi si calcola il peso di un ugual volume di aria alla temperatura e alla pressione atmosferica durante l'esperienza.

Si avrà d'altra parte il peso del vapore, in queste medesime condizioni, dal peso del palloncino pieno di vapore, a cui sia sottratto il peso del vetro e aggiunta la spinta dell'aria.

Per brevità non abbiamo accennato alle correzioni necessarie per ottenere la maggior precisione, delle quali la più importante è quella relativa alla dilatazione del palloncino.

78 — Densità di alcuni vapori. — Riportiamo qui le densità relative all'aria di alcuni vapori:

acqua	0,623	etere solforico	2,59
alcool assoluto	1,61	solfuro di carbonio	2,65.

Se i vapori e i gas seguissero esattamente le leggi di Boyle e di Gay-Lussac, i valori delle loro densità relative sarebbero indipendenti dalla pressione e dalla temperatura: ma ciò avviene soltanto in via approssimata. In generale la densità relativa dei vapori va diminuendo col crescere della temperatura e aumentando col crescere della pressione.

79 — Vapori soprasaturi. — Un vapore saturo, secondo quanto abbiamo detto nel § 75, se viene raffreddato, ritorna in parte allo stato liquido. Ma con speciali precauzioni si può tuttavia ottenere che ciò non avvenga. Si dice allora che il vapore è *soprasaturo*. In questo stato si trova in una specie di equilibrio instabile, che si rompe quando nel vapore siano sospese particelle estranee minutissime.

Prendiamo, per esempio, una grande bottiglia a tre colli (fig.41), portanti rispettivamente un manometro a mercurio e due tubi di vetro, *A* e *B*, uno dei quali — il centrale *A* — riempito di ovatta. La bottiglia contenga aria priva di pulvi-

scolo, mantenuta satura di vapor acqueo da un po' d'acqua sparsa sul fondo.

Chiudiamo *B* con un dito, soffiamo nella bottiglia per mezzo del tubo *A* altra aria priva di pulviscolo, e di poi chiudiamo anche questo tubo. Sollevando allora il dito, l'aria, che trovavasi leggermente compressa, rapidamente si espande, producendo un leggero raffreddamento. Ad onta di ciò il vapor saturo di cui era riempita la bottiglia non si condensa; mentre, se si ripete la stessa esperienza dopo aver introdotto nella bottiglia qualche poco di fumo, appena si produce l'espansione, si vede la bottiglia riempirsi di nebbia.

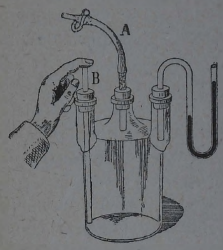


Fig. 41

80 — **Principio della parete fredda.** — Possiamo mostrare ora che, per produrre la condensazione di un vapore saturo, non è necessario abbassarne la temperatura in ogni suo punto, ma basta produrre tale abbassamento in una ristretta regione di esso. Prendiamo due canne barometriche *A* e *B* (fig. 42), la prima delle quali — piegata in alto — contiene al disopra del mercurio un po' d'etere, e l'altra funge da barometro. La differenza *h* fra le altezze delle due colonne di mercurio indica la tensione del vapor d'etere saturo. Circondando di ghiaccio dapprima solo una parte dell'estremo *M* di *A*, in seguito tutto il ramo *MN*, noteremo che si ottiene in ambedue i casi una uguale depressione del mercurio nella canna *A*. Dunque *la tensione del vapore saturo diminuisce, come se fosse stata portata alla temperatura del ghiaccio fondente, non la sola regione M, ma tutto quanto il ramo MN.*

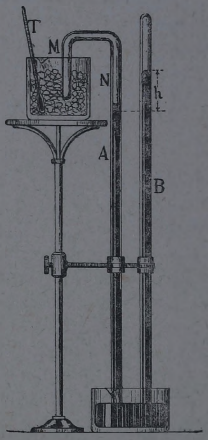


Fig. 42

Ciò avviene perchè in *M*, per il raffreddamento, il vapore si va man mano condensando; e quindi ivi la sua tensione va diminuendo, mentre nuovo vapore viene spinto da *N*, dove la tensione è maggiore.

Quando sia scomparso tutto il liquido che trovavasi al di sopra del mercurio in A, il vapore in N cessa di essere saturo, e la sua tensione continua tuttavia a diminuire senza che si arresti la condensazione in M, finchè i valori delle tensioni in N e in M si saranno pareggiati.

In tal modo si ottiene pure il trasporto del liquido dalla branca N alla branca M del tubo.

81 — **Evaporazione in seno all'aria.** — Quando l'evaporazione di un liquido avviene in seno all'aria, o ad un altro gas, *il vapore raggiunge, ad una determinata temperatura, la stessa tensione massima che si ottiene quando l'evaporazione si fa nel vuoto.* Si può verificare ciò con un apparecchio simile a quello adoperato nel § 69, con la sola differenza che la annessa canna manometrica AB (fig. 43) è questa volta aperta ai due estremi; e quindi ora, anche nelle condizioni ordinarie, il mercurio si trova allo stesso livello all'interno e all'esterno della canna.

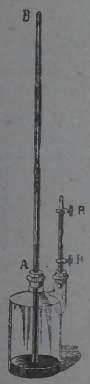


Fig. 43

Lasciando cadere dal cannello laterale nella bottiglia alcune goccie di etere, la tensione del vapore che si produce fa sollevare il mercurio nella canna manometrica; e, sebbene l'evaporazione si compia lentamente, mentre quando nella bottiglia era praticato il vuoto si compiva con grande rapidità, la colonna di mercurio tuttavia raggiunge la medesima altezza nei due casi. Quando il vapore è saturo, la evaporazione si arresta.

Nella stessa guisa avviene il fenomeno all'aria libera; ma si comprende come allora la evaporazione debba essere continua, perchè il vapore, man mano che si forma, si diffonde nella atmosfera e quindi non si mantiene saturo. Tutte le cause che aumentano la formazione del vapore, o concorrono a diffonderlo o ad allontanarlo altrimenti dalla superficie liquida, accelerano l'evaporazione: come, ad es., l'alta temperatura, la bassa pressione, l'estensione della superficie del liquido ed il rinnovamento dell'aria.

82 — **Calore di vaporizzazione.** — L'evaporazione produce sempre freddo. Molti fenomeni della vita ce lo dicono: basta versare sulla mano alcune goccie di un liquido molto volatile, ad es. etere o benzina, per averne dalla nostra sensazione una prova.

Volendo adunque mantenere costante la temperatura di un liquido mentre esso evapora, bisogna via via somministrargli calore in una certa quantità, che l'esperienza prova esser proporzionale al peso del liquido evaporato, e, a parità di peso, diversa da liquido a liquido.

E si chiama *calore di vaporizzazione* di un liquido a una data temperatura, *la quantità di calore assorbita da 1 grammo di esso liquido, mentre — mantenendosi costantemente a quella temperatura — si trasforma in vapore.*

Per l'etere a 0° il calore di vaporizzazione è di 94 calorie; per l'acqua di 606,5 a 0°, di 537 a 100°, e di 502 a 150°. Dall'esempio qui riferito per l'acqua, si vede — ciò che vale per tutti i liquidi — che *il calore di vaporizzazione diminuisce col crescere della temperatura alla quale la evaporazione avviene.* Da questo fatto e dalla relazione tra la densità del liquido e quella del suo vapore saturo, indicata nel § 76, il Mathias è arrivato alla seguente legge:

Coll' avvicinarsi della densità del vapore saturo alla densità del liquido, il calore di vaporizzazione diminuisce e tende verso zero.

Ebollizione.

83 — 1ª e 2ª legge dell'ebollizione. — Quando scaldiamo un liquido sottoposto alla pressione atmosferica, da principio — come abbiamo visto — la produzione di vapore ha luogo soltanto alla superficie del liquido; ma poi, continuando il riscaldamento, le pareti del recipiente si ricoprono di piccole bolle gassose, dovute al dilatarsi dell'aria che aderiva alle pareti stesse. Queste bolle di aria, in parte salgono a galla, in parte dànno luogo a formazione di bolle di vapore saturo del liquido, le quali pure salgono alla superficie, producendo la così detta *ebollizione.*

Immergendo nel liquido un termometro, si riconosce che *durante l'ebollizione la temperatura si mantiene costante* (1ª legge): e ciò indica che il calore somministrato al liquido viene interamente utilizzato per produrre la trasformazione in vapore.

Varia però da liquido a liquido la temperatura alla quale si produce l'ebollizione, e ciò si esprime dicendo che *ogni liquido alla pressione normale* (di 76 cm. di mercurio) *ha*

un proprio punto di ebollizione (2ª **legge**). Esso è per l'alcool 78°,4, per l'etere 34°,9, ecc.; per l'acqua, giusta la convenzione sul modo di graduare i termometri, tale punto corrisponde alla temperatura di 100°.

84 — **Soprariscaldamento dei liquidi.** — Con facili precauzioni si può tuttavia portare l'alcool, l'etere, la benzina, ecc., di parecchi gradi al di sopra del loro punto di ebollizione, senza che l'ebollizione si produca. Basta a tal uopo disaerare, il più che sia possibile, il liquido e le pareti del recipiente in cui è contenuto. Ad esempio, in una provetta accuratamente lavata, poniamo del solfuro di carbonio, e facciamolo bollire una prima volta a bagnomaria in un pallone (fig. 44), dove poniamo anche un termometro. Tronchiamo subito l'ebollizione, estraendo la provetta dal bagno, e dopo breve tempo immergiamovela di nuovo: osserviamo che non avviene più l'ebollizione, sebbene il bagno abbia la stessa temperatura di prima, od anche un po' superiore. Il liquido si dice allora *soprariscaldato*.

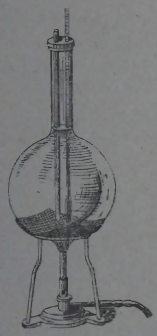


Fig. 44

85 — **Meccanismo dell'ebollizione. 3ª legge** — Approfittiamo del fenomeno del soprariscaldamento per studiare il modo in cui la ebollizione si produce. In un pallone accuratamente pulito facciamo bollire lungamente dell'acqua distillata; indi allontanando la lampada arrestiamo per qualche momento la ebollizione; e infine riscaldiamo di nuovo, per un tempo sufficiente a portare l'acqua poco al disopra di 100°. Questa sarà così soprariscaldata. Introducendo allora nel pallone (fig. 45) una bacchetta di vetro che termina in una campanellina, vediamo dopo brevi istanti salire dalla campanella numerosissime bolle, e la temperatura scendere a 100°.

Dunque, perchè un liquido entri in ebollizione, è necessaria in esso la presenza di un gas: in questa esperienza è il gas portato dalla campanella.

È facile ora comprendere il meccanismo dell'ebollizione: consideriamo nell'interno del liquido una bolla d'aria; in essa il liquido evapora come nell'aria libera, e poichè siamo in presenza del liquido da ogni parte, il vapore in essa formato

sarà saturo, e la sua tensione sarà pari alla tensione massima che gli è propria alla temperatura a cui il liquido si trova.

D' altra parte la bolla, nell' interno del liquido, è sottoposta ad una pressione eguale alla pressione atmosferica aumentata della pressione che esercita la colonna liquida sovrastante; ora se si fa innalzare via via la temperatura del liquido, arriverà un momento in cui la tensione del vapore saturo nell' interno della bolla sarà uguale alla pressione cui essa è sottoposta.

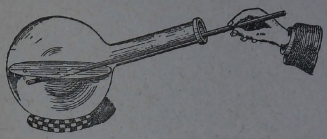


Fig. 45

Allora la bolla, per formazione di nuovo vapore, rapidamente si ingrandisce, e, per il principio di Archimede, sale alla superficie del liquido. Così si ha l' ebollizione.

Se trascuriamo il valore della pressione esercitata sulle bolle dal liquido sovrastante, potremo concludere quindi che *l' ebollizione di un liquido si produce quando esso ha raggiunto la temperatura a cui il suo vapor saturo ha una tensione eguale alla pressione esterna* (3ª legge).

86 — Influenza della pressione sulla temperatura di ebollizione. — In conseguenza della legge ora enunciata, l' acqua, tenuta ad una pressione inferiore a 760 millimetri, deve bollire al disotto di 100°. E infatti, prendiamo un pallone di vetro, pieno circa per $\frac{1}{3}$ di acqua (fig. 46), e facciamo bollire questa finchè il vapore abbia scacciato tutta l'aria. Allora, mentre l' acqua bolle, tappiamolo, e capovolgiamolo, immergendone la bocca in una vasca di acqua. L'ebollizione cessa; ma se poi raffreddiamo in un modo qualunque la parte superiore

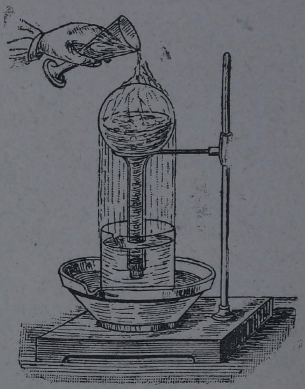


Fig. 46

del pallone, vediamo che l'acqua ricomincia a bollire. Ciò avviene perchè il raffreddamento della parete del pallone produce la condensazione di una parte del vapore, e quindi un abbassamento della pressione sulla superficie dell' acqua.

Sul monte Bianco, dove la pressione è di circa 416 mm., l' acqua bolle a 84°.

Per contro, esercitando sull' acqua una pressione superiore ai 760 mm., il punto di ebollizione dovrà salire al disopra di 100°. Ciò si dimostra con la *pentola di Papin*, la quale consiste in un robusto cilindro di bronzo *C* (fig. 47) contenente acqua, chiuso perfettamente da un coperchio, mediante una vite *V*. Il coperchio reca una *valvola di sicurezza*, su cui un peso *P*, scorrevole lungo una leva, esercita una pressione variabile colla sua distanza dal fulcro. Quando il vapore raggiunge una pressione troppo forte, la valvola si solleva, lascia sfuggire il vapore, ed è evitato lo scoppio.

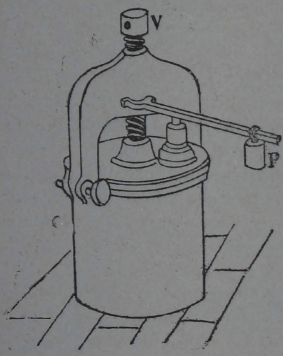


Fig. 47

In questo apparecchio l'acqua può, col riscaldamento, raggiungere una temperatura superiore a 100°, perchè il vapore che si forma determina una pressione, la quale cresce continuamente al crescere della temperatura, e quindi impedisce l' ebollizione.

A 2 atmosfere la temperatura di ebollizione dell' acqua è di 120°, a 10 atmosfere di 180°, a 20 atmosfere di 213°. Il simigliante accade per tutti gli altri liquidi: per es. l' alcool e l'etere bollono a 100° quando la pressione esercitata alla loro superficie abbia rispettivamente il valore di 170 cm. e di 495 cm. di mercurio.

87 — **Stato sferoidale.** — Facendo cadere piccola quantità di un liquido sopra una superficie riscaldata ad una temperatura alquanto superiore alla temperatura di ebollizione del liquido stesso, questo si raccoglie in goccie, che vagano qua e là, rimpicciolendo a poco a poco, e conservando nel loro interno una temperatura inferiore al punto di ebollizione. Si dice allora che il liquido si trova allo *stato sferoidale*, e il fenomeno si

chiama *calefazione*. In queste condizioni il liquido evapora assai lentamente, perchè la goccia è mantenuta sollevata in aria dai vapori che si formano e che, per la loro scarsa conducibilità, la proteggono dall'azione diretta del calore. Quando la superficie si raffredda, il liquido, venendo in contatto con essa, si mette bruscamente a bollire, crepitando. con proiezione di particelle in tutti i sensi.

Questo fenomeno spiega molti fatti: per esempio come i fonditori possano immergere per un momento la mano umida nella ghisa o nel bronzo fuso, senza risentirne danno.

Ebollizione ed evaporazione delle soluzioni.

88 — Nello studio fatto sinora dell'evaporazione e dell'ebollizione dei liquidi abbiamo implicitamente supposto che essi fossero puri: supponiamo ora di avere un liquido che contenga in soluzione una sostanza, ad esempio dell'acqua in cui sia stato disciolto del cloruro di sodio. Scaldando questo liquido, vedremo che, sotto la pressione atmosferica, non bolle a 100°, ma ad una temperatura superiore.

Questa temperatura cresce colla concentrazione: così, mentre 10 grammi di sale in 100 grammi d'acqua producono l'innalzamento di 1°,5 nella temperatura di ebollizione, 25 grammi producono un aumento di 5°, e 40 grammi un aumento di 8°,5.

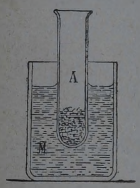


Fig. 48

Si ha innalzamento del punto di ebollizione non solo quando il soluto è un solido, ma ancora quando è un liquido. Per dimostrarlo, poniamo in un recipiente *M* (fig. 48) una soluzione di essenza di trementina nell'etere, e immergiamovi una provetta *A* nella quale si trovi etere puro.

Scaldando il bicchiere a bagnomaria, vedremo l'ebollizione dell'etere puro nella provetta, senza che bolla il liquido esterno. Se poi aggiungiamo goccia a goccia essenza di trementina nella provetta, possiamo ottenere che bolla il liquido esterno senza che bolla quello interno.

Ma siccome l'ebollizione di un liquido si verifica a quella temperatura alla quale la tensione del suo vapor saturo pareggia la pressione esterna (§ 85), vuol dire che alla temperatura di ebollizione del solvente, il vapor saturo della soluzione

non ha raggiunto ancora la tensione uguale alla pressione esterna. Perciò dovremo concludere che: *la presenza del soluto abbassa la tensione del vapore del solvente puro.*

Ora, si trova che, per le soluzioni diluite di varie sostanze in uno stesso solvente, l'innalzamento del punto di ebollizione di questo e la diminuzione della tensione del suo vapore saturo dipendono solo dal rapporto che esiste fra il numero delle molecole del solvente e quello della sostanza soluta. Così, in una soluzione di etere solforico, che per ogni 99 molecole di etere contenga *una* molecola della sostanza disciolta, si ha un innalzamento di 0°,284 *qualunque sia* la sostanza medesima: o cloroformio, o anilina, ecc.

Tale risultato non è soltanto applicabile all'ebollizione, ma è generale; esso vale per l'abbassamento della tensione del vapor saturo a qualunque temperatura.

Potremo dunque dire che: *ad una temperatura qualunque, l'abbassamento della tensione del vapor saturo di una soluzione diluita, per un dato solvente, è uguale per tutte le soluzioni che, a parità di peso del solvente, contengono un egual numero di grammi-molecole del soluto.*

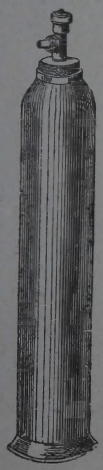


Fig. 49

Questa legge è analoga a quella relativa all'abbassamento del punto di solidificazione delle soluzioni (§ 67): e può come questa essere applicata alla determinazione del peso molecolare di alcune sostanze.

Liquefazione dei gas.

89 — Poichè abbiamo visto che i vapori si possono rendere saturi e liquefare riducendone il volume, cioè comprimendoli, può sembrare che ciò debba avvenire per tutti gli aeriformi. E infatti si possono rendere liquidi molti gas, alla temperatura ordinaria, sottoponendoli a pressioni sufficienti: così, a 10°, è liquida l'anidride solforosa, sotto la pressione di 2,3 atmosfere, l'ammoniaca, sotto quella di 6 atmosfere, l'anidride carbonica, sotto 46 atmosfere. Talchè questi gas, ora, si trovano in commercio liquefatti, entro robusti tubi di vetro, o cilindri di ferro (fig. 49) chiamati *bombole*.

Però *non tutti i gas possono essere liquefatti per compressione alla temperatura ordinaria.* Alcuni di essi: l' ossigeno, l' azoto, l' idrogeno, l' ossido di carbonio, il metano, e il biossido di azoto, pur assoggettati dal Natterer a pressioni di 3600 atmosfere, conservarono, alle comuni temperature, sempre lo stato gassoso.

90 — **Fenomeno di Cagnard de la Tour.** — L' impossibilità di liquefare certi gas comprimendoli senza raffreddarli, è in istretta relazione con un altro fenomeno, scoperto dal Cagnard de la Tour, e che si può facilmente osservare col seguente apparecchio.

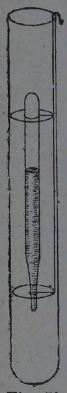


Fig. 50

In un tubo di vetro, della lunghezza da 6 a 8 centimetri, è rinchiusa dell' anidride solforosa, che occupa la parte inferiore — per poco più di un terzo — allo stato liquido, e la parte superiore allo stato gassoso (fig. 50). Il tubo è sospeso entro una provetta di vetro piena di paraffina fusa, e la provetta vien collocata davanti a una lampada di proiezione per produrre l' immagine del tubo su di uno schermo.

Elevando via via la temperatura della provetta, mediante una fiamma sottoposta, si osserva in principio, fra l' anidride liquida e il suo vapore, una netta superficie di separazione, costituita da un menisco concavo (fig. 51). Ma a poco a poco il menisco va diventando sempre più piano, e va prendendo l' aspetto di un velo sottilissimo, che si vede ondeggiare, quando si dà una piccola scossa all' apparecchio, come se fosse immerso nell' aria e scosso dal vento. Ciò dimostra che, *in quelle condizioni, il liquido ha una mobilità molto maggiore che nelle condizioni ordinarie e comparabile con quella dei gas.*

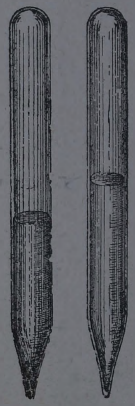


Fig. 51

Nel frattempo si vede che il menisco va sollevandosi, sino ad arrivare quasi a metà del tubetto, per l' aumento di volume subìto dal liquido. Ciò prova che *il liquido è diventato molto dilatabile:* proprietà anche questa che lo fa rassomigliare ai gas.

Scaldando ancora, ad una data temperatura avviene il sorprendente fenomeno della scomparizione del menisco. In questo istante — dobbiamo concludere — tutto il liquido si è convertito in aeriforme. D' allora in poi si ha nell' interno del tubo una massa omogenea, che si comporta come un gas fortemente compresso.

Tanto gli altri gas liquefatti, quanto i liquidi ordinari, presentano il fenomeno di Cagnard de la Tour; però ad una temperatura diversa da liquido a liquido.

91 — **Temperatura critica.** — A temperature più alte, per quanto si comprima l' aeriforme, non si riesce più a far ricomparire il menisco di separazione, ch' è l' indizio della presenza del liquido.

Esiste dunque, per ogni gas, una temperatura, al di sopra della quale esso non può essere liquefatto, qualunque sia la pressione a cui si sottopone; tale temperatura è stata chiamata *temperatura critica.*

La temperatura critica dell' anidride solforosa è 156°, quella dell' ammoniaca 130°, quella del cloro 141°, e quella dell' anidride carbonica 31°. Questi gas possono dunque essere liquefatti per compressione senza raffreddamento.

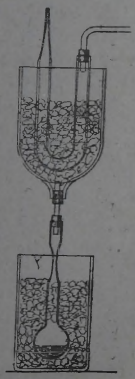


Fig. 52

L' ossido di carbonio, il biossido d' azoto, il metano, l' ossigeno, l' azoto, l' aria, l' idrogeno hanno una temperatura critica molto al di sotto dello zero, e perciò non si possono liquefare, senza prima averli grandemente raffreddati.

92 — **Liquefazione dei gas per raffreddamento.** — Invece di comprimere i gas alle comuni temperature, per liquefarli si possono anche raffreddare, tenendoli alla pressione ordinaria.

Adoperiamo a tale scopo il tubo a condensazione del Gobel, rappresentato dalla figura 52, costituito da un tubo di vetro ad U comunicante al di sotto, mediante un cannello verticale, con un palloncino pure di vetro. Si fa passare il gas nel tubo ad U, che è posto in una mescolanza frigorifera: e allora il gas si liquefa e scende nel pallone, che è tenuto esso pure

in un miscuglio refrigerante. In questa maniera si ottiene la liquefazione dell' anidride solforosa a —10°, quella dell' ammoniaca e del cloro a circa —33°, quella del cianogeno a —20°,7, etc.

Il raffreddamento per la liquefazione di un gas può ottenersi a spese della sua dilatazione. Se si lascia espandere repentinamente un gas portato ad alta pressione, il raffreddamento può essere così forte, da ottenere prima la liquefazione e poi anche la solidificazione di una parte del gas stesso.

Con le bombole di anidride carbonica liquefatta, che si trovano in commercio, si ottiene l' anidride solida, lasciando sfuggire dal rubinetto il gas liquefatto. Si mette la bombola inclinata (fig. 53) in modo che il rubinetto sia rivolto verso il basso, e si lega intorno ad esso un sacchetto di tela.

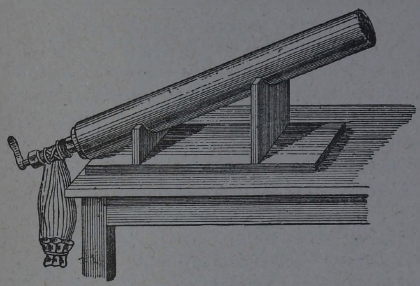


Fig. 53

Quando si apre il rubinetto, per la grande pressione del gas che entro la bombola sovrasta al liquido, questo viene spruzzato violentemente entro il sacchetto sotto forma di minutissime ed abbondantissime goccie, che vaporizzano rapidamente. E in conseguenza la sottrazione di calore alla parte liquida della goccia è così repentina, che il liquido non ha tempo di rifornirsi di calore dall'ambiente, perciò parte della goccia solidifica. Nel sacchetto si forma così della *neve di anidride carbonica*, la quale viene adoperata soprattutto per fare miscugli frigoriferi.

93 — Azione simultanea del raffreddamento e della pressione. — Accoppiamo adesso l' azione del raffreddamento con quella della compressione, e prendiamo, per es., un tubetto di vetro chiuso, nel quale sia contenuta anidride carbonica compressa sino a circa 40 atmosfere. A tale pressione, alla temperatura ordinaria, essa è allo stato gassoso; ma basta affondare alquanto l' estremità del tubo in un pezzo di ghiaccio (fig. 54), per vedervi subito comparire l' anidride liquefatta. Se l' anidride

invece fosse stata soggetta alla pressione di una o poche atmosfere, sarebbe stato necessario, per liquefarla, un raffreddamento di varie decine di gradi al disotto dello zero.

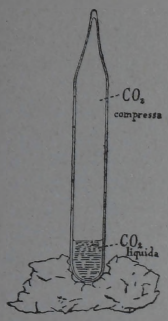


Fig. 54

Da questo esempio si vede che, se la azione del raffreddamento è unita a quella della compressione, sono sufficienti per la liquefazione temperature meno basse e pressioni meno elevate che non adoperando separatamente l'una o l'altra di queste due azioni.

94 — Vasi del Dewar. — I gas liquefatti non si possono conservare a lungo nei recipienti ordinari, dove, ricevendo rapidamente calore dall'ambiente, vaporizzano con grandissima celerità.

Per impedire lo scambio di calore con l'esterno, il Dewar pensò di costruire vasi speciali di vetro a doppia parete (fig. 55), e di praticare nello spazio compreso fra le due pareti *S*, *S* un vuoto molto spinto.

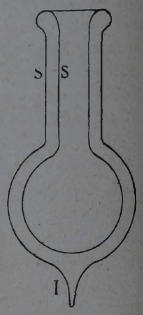


Fig. 55

Così viene evitato quasi totalmente il passaggio di calore per convezione fra la parete interna e l'esterna, e si ottiene un isolamento grandissimo.

Per aumentare ancora il potere isolante di questi vasi, quando non occorra vedere nell'interno, si argentano le due superficie prospicienti lo spazio vuoto, perchè, avendo le superficie speculari un piccolo potere emissivo (§ 50) e un piccolo potere assorbente (§ 52), vengono così evitate in gran parte anche le perdite per irraggiamento.

L'evaporazione in tali recipienti è in tal modo molto diminuita; però è ancora ben lungi dall'essere trascurabile.

Questi recipienti, quando contengono allo stato liquido dei gas difficilmente liquefacibili, devono esser tenuti aperti, o chiusi con un batuffolo di cotone, chè altrimenti scoppierebbero.

95 — Liquefazione dell'aria. — In questi ultimi anni ha assunto una speciale importanza, per usi scientifici e anche industriali, l'aria allo stato liquido.

Per liquefare l' aria, si profitta soltanto del raffreddamento che si ha dall' espansione dell' aria medesima, senza ricorrere a nessun liquido refrigerante ausiliario.

L' apparecchio che si adopera può essere schematicamente rappresentato dalla figura 56.

L' aria, compressa a 180 atmosfere, giunge pel tubo *v* al rubinetto *R*; aprendo questo colla manovella *M*, l' aria si espande in un recipiente chiuso, raffreddandosi circa $^1/_4$ di grado per

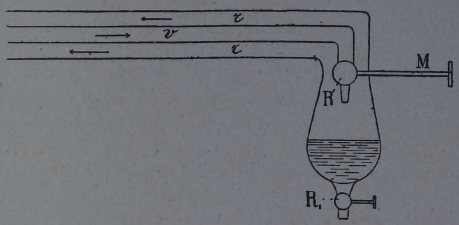


Fig. 56

ogni atmosfera di pressione perduta. Per uscire da questo recipiente, l' aria fredda è costretta a passare per un tubo *rr*, il quale circonda il tubo *v*; e così si raffredda la nuova aria compressa che giunge per *v*. Perciò nell' espansione di questa nuova aria si otterrà una temperatura più bassa di prima.

Il raffreddamento continua in tal modo, fino al momento in cui si raggiunge la temperatura della liquefazione dell' aria: a partire da questo momento, il calore assorbito nell' espansione non può più tradursi in un abbassamento di temperatura, ma produce la liquefazione di una parte dell' aria, e la porzione liquida si accumula in fondo al recipiente, dal quale può farsi sgorgare mediante il rubinetto R_1.

In pratica i due tubi *v* ed *r* concentrici hanno una lunghezza considerevole; e perciò essi vengono ravvolti a spirale in modo da formare un doppio serpentino, che è tenuto in un recipiente metallico in mezzo a fiocchi di lana compressa, per preservarlo dal calore dell' ambiente.

Con tali apparecchi oggi l' aria liquida, che prima si preparava solo qualche volta per ricerche scientifiche, si produce così economicamente, che riceve utili applicazioni nelle industrie.

96 — Proprietà dell' aria liquida. — L' aria liquida è di colore azzurrognolo, e trasparente come l' acqua. Essa presenta,

appena fabbricata, un aspetto leggermente opalescente, dovuto alla presenza di cristalli minutissimi di ghiaccio e di anidride carbonica, che possono facilmente rimoversi facendo passare l' aria liquida attraverso uno dei soliti filtri di carta. Durante l' evaporazione dell' aria liquida si formano fumi biancastri, costituiti di cristalli di ghiaccio dovuti alla condensazione dell' umidità atmosferica.

La temperatura di ebollizione dell' aria liquida è di — 190° circa, la sua densità varia da 0,93 a 1,12. Questa variazione dipende dal fatto che l' aria liquida è una miscela di azoto e di ossigeno liquidi; l' azoto, bollendo a temperatura più bassa dell' ossigeno, evapora più rapidamente di questo, e siccome è più leggero, l' aria liquida va aumentando di densità, a mano a mano che l' azoto vien meno.

97 — Applicazioni dell' aria liquida. — A cagione della maggiore volatilità dell' azoto, l' aria liquida va diventando sempre più ricca di ossigeno; e su ciò è fondato un metodo di preparazione industriale dell' ossigeno dall' aria liquida.

Non è qui il luogo di descrivere l' apparecchio all' uopo adoperato: ci limiteremo a dire che in esso si utilizzano le frigorie prodotte nell' evaporazione dell' azoto e dell' ossigeno, per ottenere più facilmente nuova aria liquida.

A cagione della sua bassa temperatura, l' aria liquida liquefa e solidifica quasi tutti gli altri gas, e solidifica quasi tutti i liquidi. Ad esempio, tutti i componenti del gas illuminante sono da essa congelati, ad eccezione dell' idrogeno; e di ciò si approfitta in un metodo per la preparazione industriale di questo gas. Il gas illuminante vien fatto arrivare in un recipiente della forma indicata dalla figura 57, tenuto immerso nell' aria liquida. Si può facilmente constatare che il gas che n' esce è puramente idrogeno, dalla fiamma incolora che si ottiene accendendolo.

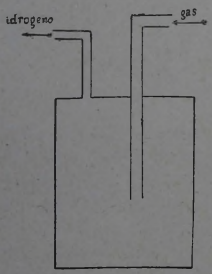


Fig. 57

Tra i liquidi, il mercurio, che si congela a — 40°, è solidificato con grande facilità; e diventa talmente duro, che con esso si possono foggiare oggetti confrontabili per solidità con quelli di ferro.

Solo l'etere di petrolio, che distilla da 33° a 35°, non si lascia congelare dall'aria liquida, ed è perciò adoperato per la costruzione di termometri di uso molto pratico per le basse temperature.

Molti corpi solidi, quando sono portati alle temperature che si ottengono con l'aria liquida, subiscono modificazioni inaspettate. Così, con la semplice immersione nell'aria liquida, un tubo di gomma diventa rigido e fragile come fosse di vetro; una spirale di piombo si trasforma in una molla robusta; un campanello di piombo rende una nota squillante quasi fosse di argento; un pezzo di feltro, qualunque tessuto vegetale o animale, acquista la rigidità della pietra, e può essere polverizzato con un martello.

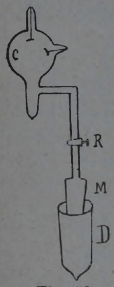


Fig. 58

Il carbone, portato alla temperatura dell'aria liquida, acquista la proprietà importantissima di assorbire i gas con facilità straordinaria. Di questa proprietà si approfitta per produrre facilmente un vuoto estremo nei tubi di Crookes, nelle lampadine elettriche a incandescenza, ecc. Il procedimento è mostrato nella figura 58. Il recipiente *C*, nel quale si è fatto la rarefazione raggiungibile colle ordinarie pompe, comunica, per mezzo di un rubinetto *R*, con un recipiente *M* di metallo pieno di carbone di legno. Si immerge il tubo *M* in un vaso *D* contenente aria liquida, e si apre il rubinetto *R*. La massima parte del gas rimasto in *C* si condensa nel carbone, e così si può ottenere un vuoto spinto fino a $\frac{1}{10.000.000}$ di atmosfera.

98 — **Fabbricazione del ghiaccio artificiale.** — Fra le più importanti applicazioni dei gas liquefatti è la fabbricazione del ghiaccio artificiale, mediante il freddo prodotto dalla vaporizzazione di siffatti liquidi. A tal uopo sono impiegati ordinariamente l'anidride solforosa, l'ammoniaca e l'anidride carbonica. Questi gas liquefatti vengono lasciati espandere a bassa pressione entro serpentini di rame, immersi in un bagno contenente una soluzione di cloruro di calcio nell'acqua, la quale non congela che a temperature molto basse. Nel bagno sono collocati degli stampi di zinco pieni d'acqua pura. La soluzione, pel freddo prodotto dall'espansione del gas liquefatto,

scende ad una temperatura inferiore allo zero, e produce così la solidificazione dell'acqua negli stampi.

I serpentini per altra parte sono posti in comunicazione con un aspiratore, il quale, mentre produce una bassa pressione, e quindi favorisce l'espansione del gas, serve a ottenere il ricupero del gas stesso, che — mediante un apposito compressore — viene liquefatto nuovamente e rimandato nei serpentini.

Cenni sulla termodinamica e sulle macchine termiche.

Equivalente meccanico del calore.

99 — **Principio di Mayer.** — Nei fenomeni termici che fin qui abbiamo esaminato, ad ogni acquisto di calore per parte di un corpo, corrisponde una diminuzione di calore per parte di altri corpi; e si potrebbe quindi dedurre che, nei fenomeni

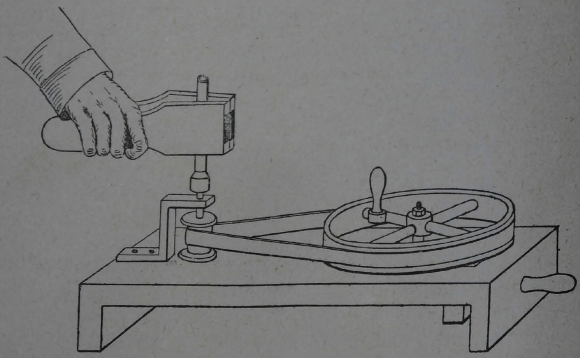


Fig. 59

termici che si verificano in un sistema di corpi isolati, la quantità di calore rimane costante.

Ma una tale affermazione, quando si voglia estendere a *tutti i fenomeni termici*, viene contraddetta dai fatti. Mettiamo in rapida rotazione, fra due mascelle di legno (fig. 59),

un tubo metallico, contenente un liquido che bolla facilmente, per es. etere solforico.

L'attrito del legno col metallo produce ben presto una quantità di calore sufficiente a portare all'ebollizione l'etere, e quindi a far saltare il tappo di sughero, che chiude il tubo.

Questa quantità di calore non è stata sottratta a nessuna parte del sistema, perchè tutte le parti dell'apparecchio hanno anzi aumentato la loro temperatura.

Unico fatto, a cui possiamo attribuire la produzione del calore, è l'attrito del tubo contro la mascella di legno.

Un altro esempio chiarirà ancor meglio il fenomeno.

Lasciamo cadere una palla sopra un piano di marmo da un'altezza *h*. Se la palla è d'avorio, essa rimbalza quasi fino alla medesima altezza, in modo che l'energia cinetica da essa posseduta al momento dell'urto sul piano si converte tutta nell'energia potenziale che acquista in conformità del principio della conservazione dell'energia (Vol. I, § 132). Ma se la palla è di piombo, essa non rimbalza, bensì resta schiacciata contro il piano, in apparente contrasto col principio suddetto. Si può però riconoscere che la massa del piombo nell'urto si è riscaldata.

Dunque in luogo dell'*energia cinetica* è comparsa, anzichè dell'energia potenziale, una *quantità di calore*.

Ora, per imprimere alla palla la velocità che aveva al momento dell'urto sul piano, occorre spendere un determinato lavoro — lavoro, che nel caso della caduta libera della palla è fatto dalla gravità — equivalente all'energia cinetica da essa acquistata. Possiamo dire perciò che, come effetto del lavoro speso, abbiamo ricavato una certa quantità di calore.

La stessa cosa avviene nel caso del nostro primo esperimento: al lavoro speso per far ruotare il tubo metallico fra le mascelle di legno, non corrisponde una quantità equivalente di energia, nè statica, nè cinetica, ma si produce del calore, che scalda le diverse parti dell'apparecchio.

Fatti analoghi a questi ora descritti avevano già indotto i fisici a concludere, fin dalla prima metà del secolo XIX, che l'energia meccanica può convertirsi in calore; e inoltre si potè dimostrare che anche la trasformazione inversa è possibile, che cioè, del calore scompare quando si ottiene da esso del lavoro meccanico.

Le esperienze infine posero in chiaro che ad una *determinata quantità di lavoro* corrisponde in queste trasforma-

zioni una *quantità di calore costante*. Questo risultato costituisce quello ch'è chiamato il *primo principio della termodinamica* o *principio di Mayer*, che si enuncia nel modo seguente:

Nelle trasformazioni reciproche di lavoro e calore vi è un rapporto costante fra lavoro speso e calore prodotto, o fra calore speso e lavoro prodotto.

Ossia, indicando con W il lavoro e con Q il calore corrispondente, sussiste in ogni caso la relazione

$$W = EQ, \tag{11}$$

dove E è una costante, il cui valore dipende dalle unità scelte per la misura del lavoro e del calore, e a cui è stato dato il nome di *equivalente meccanico del calore*.

100 — Determinazione dell'equivalente meccanico del calore. — Si comprende senz'altro l'importanza che ha la conoscenza del valore della costante E.

Essa fu determinata con metodi svariati, di cui descriveremo uno dei primi e più classici, dovuto al Joule.

L'apparecchio è costituito da un sistema di alette, portate da un asse girevole entro un calorimetro C (fig. 60), contenente dell'acqua. Questo asse può essere messo in rotazione

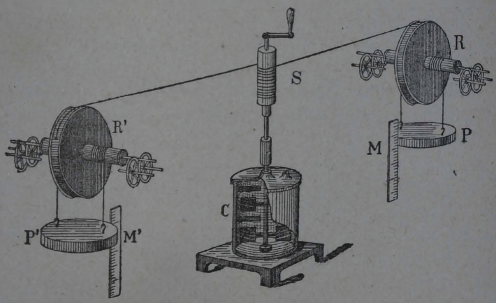


Fig. 60

mediante due funicelle avvolte su di un cilindro S e passanti nelle gole di due carrucole R, R', che vengono alla loro volta poste in rotazione per mezzo di due pesi P e P'.

Pel movimento delle palette rotanti, si sviluppa fra queste e l'acqua un forte attrito, che viene reso anche maggiore me-

diante un altro sistema di palette, fisse al vaso C, le quali impediscono all' acqua di assumere movimento di rotazione.

Per fare l' esperienza, si avvolgono le funicelle sul cilindro in modo che i pesi P e P' siano portati nella posizione più alta; e quindi si lasciano discendere i pesi stessi, con che l' asse si mette in rotazione. Allora, durante la discesa, viene compiuto dai pesi un lavoro, il quale è impiegato: *a)* a vincere gli attriti delle parti dell' apparecchio esterne al calorimetro; *b)* a comunicare una certa forza viva ai pesi; *c)* a riscaldare l' acqua in virtù degli attriti che si destano pel movimento delle palette.

Ora la misura in chilogrammetri del lavoro fatto dalla gravità, nella caduta dei due pesi P e P', indicando con p il valore in chilogrammi di ciascuno di essi, e con h l' altezza in metri da cui sono lasciati cadere, è data da $2\ p\ h$.

D' altra parte, il lavoro l, necessario per vincere gli attriti esterni al calorimetro, si valuta nel modo seguente. Si avvolgono le funicelle sul cilindro in maniera tale che i pesi P e P' tendano a far rotare l' asse in verso contrario, e quindi si facciano equilibrio; e si determina, per tentativi, il peso addizionale necessario perchè, mentre il calorimetro è vuoto di acqua, l' asse ruoti con la stessa velocità come quando è messo in rotazione dai due pesi P e P' e il calorimetro contiene acqua: il detto lavoro l è misurato allora, in chilogrammetri, dal prodotto del peso addizionale, espresso in chilogrammi, per l' altezza h, espressa in metri.

Il valore poi della forza viva impressa all' insieme delle due masse P, P', è dato, in chilogrammetri, da

$$2 \times \frac{1}{2}\ \frac{p}{9{,}81}\ v^2 = \frac{p\ v^2}{9{,}81},$$

rappresentando v la velocità, in metri al secondo, acquistata dai pesi, velocità che si misura facilmente, perchè durante la discesa finisce col diventare costante.

E infine, la misura, in grandi calorie, della quantità di calore Q, sviluppata nel calorimetro C, si ha moltiplicando il peso, in chilogrammi, dell' acqua contenutavi, per l' innalzamento di temperatura da essa subìto, e applicando al risultato le piccole correzioni necessarie.

Perciò dall' equazione

$$2ph = l + \frac{pv^2}{9{,}81} + EQ,$$

che deve sussistere per il principio della conservazione della energia, si ricava il valore di E, cioè del numero di chilogrammetri di lavoro speso per ottenere una grande caloria, ossia dell' equivalente meccanico del calore, quando si misuri il lavoro in chilogrammetri e il calore in grandi calorie.

Il riscaldamento ottenuto facendo cadere i pesi una volta soltanto è troppo debole, e quindi per ottenere un risultato attendibile bisogna ripetere l' operazione più volte.

In seguito alla discussione dei risultati delle moltissime esperienze fatte con questo metodo, e con altri differenti, si ammette come valore dell' equivalente meccanico del calore, quando il lavoro si esprime in chilogrammetri e il calore in grandi calorie, il numero 427.

Energia interna.

101 — **Teoria cinetica della materia.** — L' equivalenza, che ora abbiamo dimostrato, fra calore e lavoro, conduce a considerare il calore come una forma di energia.

Ma non la si ritiene come una forma diversa da quelle che già conosciamo: si pensa che consista in energia cinetica posseduta dalle molecole, le quali si ritengono dotate di continuo movimento. Si immagina cioè — secondo una teoria ch' è detta *teoria cinetica della materia* — che le molecole dei corpi si agitino senza posa, muovendosi in ogni senso con varia velocità, percorrendo nei solidi e nei liquidi delle orbite chiuse, nei gas orbite a tratti rettilinei, mutuamente intralciantisi: e colla forza viva posseduta così dalle molecole noi appunto identifichiamo l' energia calorifica.

Innalzare la temperatura di un corpo in questa concezione significa, dunque, accrescere la velocità media, e quindi la forza viva media, molecolare. E ciò noi possiamo ottenere sia col mettere a contatto con quel corpo un altro più caldo, le cui molecole comunicheranno allora a quelle del primo parte della loro forza viva; sia anche compiendo in qualche modo del lavoro che abbia anch' esso per effetto di accrescere la velocità delle molecole del corpo.

Ma si osservi che non sempre si ha equivalenza fra lavoro fornito ad un corpo e calore comparso.

Prendiamo, ad esempio, un chilogrammo di ghiaccio a 0°, e trasformiamolo, senza farne variare la temperatura, in un chilogrammo d' acqua.

In questa trasformazione il ghiaccio non acquista nessuna energia visibile, ed anche la forza viva media delle sue molecole rimane invariata. Tuttavia esso ha ricevuto calore e lavoro compiuto da forze esteriori: cioè, il calore ch' è stato necessario per fonderlo, e il lavoro fatto dalla pressione durante la diminuzione di volume che esso ha subìto nella fusione.

Il principio della conservazione dell' energia sarebbe in difetto, se lo stato finale del corpo fosse identico allo stato iniziale; ma non è identico a questo.

Si deve credere quindi che, nel passaggio dall' uno all' altro stato, il corpo abbia acquistato una certa quantità di energia invisibile, diversa dal calore, equivalente al calore e al lavoro ricevuto.

Questa energia si ritiene essere energia potenziale, posseduta in parte dalle molecole, le quali esercitano fra loro azioni scambievoli, e in parte dagli atomi facenti parte di una stessa molecola.

Dobbiamo dunque figurarci un corpo come un serbatoio di energia di varie forme, la quale può essere, con opportuni processi, aumentata e diminuita. E diremo in conseguenza che un grammo di un corpo, *in uno stato ben determinato,* contiene determinate quantità di queste energie, al cui insieme si dà il nome di *energia interna.*

Il valore assoluto dell' energia interna di un corpo è a noi totalmente sconosciuto: noi possiamo determinare soltanto le variazioni che essa subisce.

102 — Pressione e velocità molecolare. — La teoria cinetica della materia dà luogo ad alcune conseguenze importanti, che è bene esporre brevemente.

Anzitutto questa teoria ha condotto ad ammettere che la pressione, esercitata da un fluido contro le pareti di un recipiente in cui si trovi rinchiuso, sia dovuta agli urti delle molecole contro le pareti stesse; e dietro semplici considerazioni si è arrivati a stabilire che tale pressione è proporzionale al quadrato della velocità media delle molecole.

103 — Forza viva molecolare e temperatura. — Inoltre, secondo quanto abbiamo detto, è mestieri concludere che il calore somministrato ad un corpo può produrre due effetti distinti:

1.° eseguire un lavoro esterno, quale è quello che si compie vincendo la pressione atmosferica mentre il corpo si dilata:

2.° accrescere l' energia interna del corpo stesso.

Ora, secondo la teoria cinetica, nell' accrescere l' energia interna si spende calore in tre modi:

1.° *eseguendo un lavoro interno*, cioè il lavoro occorrente a vincere la mutua azione delle molecole, coll' allontanarle o col distribuirle diversamente: con ciò si accresce l' energia potenziale delle molecole;

2.° *nell' aumentare la velocità, e quindi la forza viva, delle molecole:* e nella teoria cinetica si dimostra che è appunto tale porzione di calore *la sola* che venga impiegata nell' innalzamento della temperatura;

3.° *ad accrescere l' energia atomica* delle singole molecole. Quest' ultima parte è molto piccola per tutti i corpi, quando non intervengano azioni chimiche.

Negli aeriformi poi, ove le molecole sono sottratte quasi del tutto ad ogni mutua azione, è trascurabile anche il lavoro interno. Perciò quasi tutto il calore somministrato è allora impiegato ad accrescere la temperatura, cioè la forza viva molecolare, e a produrre la dilatazione del gas, ossia a compiere un lavoro esterno.

Ne risulta quindi che *le variazioni di energia interna di un aeriforme si riducono essenzialmente alle variazioni di forza viva molecolare.*

104 — Riscaldamento e raffreddamento dei gas per effetto della compressione e dell' espansione. — Questa deduzione è in perfetto accordo con alcune delle proprietà dei gas; ad esempio col raffreddamento che si verifica nella loro espansione, e col riscaldamento che si ha nella loro compressione.

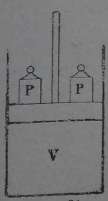


Fig. 61

Supponiamo di avere un gas rinchiuso in un cilindro V (fig. 61) da uno stantuffo mobilissimo, gravato di pesi P. Inoltre supponiamo che tanto il cilindro quanto lo stantuffo siano costituiti di una sostanza perfettamente isolante per il calore. Se togliamo alcuni di questi pesi, il gas si espande e compie un lavoro sollevando i pesi rimanenti. Questo lavoro,

per il principio della conservazione dell' energia, deve essere eseguito a spese di energia posseduta e ceduta dal gas. Ma il gas non ha altra provvista cedibile di energia se non quella cinetica posseduta dalle sue molecole; perciò questa deve diminuire, ossia il gas durante l' espansione si dovrà raffreddare. Ed infatti lasciando sfuggire nell' aria un gas compresso, con che è vinta la pressione atmosferica, esso si raffredda.

Inversamente, se aggiungiamo dei pesi sullo stantuffo, il volume del gas diminuisce, e i pesi, scendendo, compiono un lavoro contro la pressione antagonista del gas.

L' energia potenziale delle molecole del gas non si accresce, perchè, come dicemmo, non esistono azioni sensibili fra le molecole degli aeriformi; si accrescerà perciò la loro forza viva, ossia aumenterà la temperatura del gas. Ciò che è pure verificato dall' esperienza.

Poniamo, infatti, un pezzetto di fosforo in fondo a un cilindro di vetro, nel quale scorra uno stantuffo a tenuta d' aria. Spingendo repentinamente lo stantuffo, vedremo il fosforo incendiarsi per effetto dell' innalzamento di temperatura del gas.

Questi due esempi confermano come non solo da un lavoro si possa ottenere del calore, ma che è possibile la trasformazione inversa del calore in lavoro.

Dalla teoria cinetica abbiamo inoltre una chiara spiegazione della modificazione della velocità molecolare, ossia della temperatura del gas, per effetto del moto dello stantuffo.

Quando lo stantuffo discende, le molecole che urtano contro di esso rimbalzano con una velocità maggiore di quella con cui gli vengono incontro, e perciò la temperatura aumenta; mentre invece, quando lo stantuffo si innalza, tornano indietro con minore velocità, e perciò la temperatura diminuisce.

105 — Temperatura assoluta. -- La pressione che esercita il gas contro la parete dello stantuffo, è data, come dicemmo, dagli urti delle molecole del gas contro la parete stessa; essa risulta proporzionale al quadrato della velocità media da cui sono animate le molecole: quindi crescerà rapidamente al crescere di tale velocità e si annullerà quando la velocità delle molecole sarà nulla.

Ma la temperatura di un gas decresce, secondo la teoria cinetica, al decrescere della forza viva molecolare: perciò, quando la velocità delle molecole gassose sarà nulla, si avrà la più bassa temperatura possibile per un gas.

Questa temperatura corrisponde dunque alla pressione *zero*. Ora, per una massa qualunque di gas, la legge dello stato aeriforme ci dà (§ 36)

$$p_t\, v_t = p_0\, v_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right);$$

e quindi, indicando ora con t la temperatura alla quale la pressione p_t è nulla, si avrà

$$0 = p_0\, v_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right).$$

Poichè $p_0\, v_0$ ha un valore ben determinato e diverso da zero, dovrà essere

$$1 + \frac{t}{273} = 0,$$

da cui

$$t = -273.$$

Poichè tale temperatura è la più bassa possibile, è naturale che sia venuta l' idea di indicarla con lo *zero*, e di contare da essa le temperature.

A questa origine della scala delle temperature è stato dato il nome di *zero assoluto*, e alla temperatura contata a partire da tal punto, quello di *temperatura assoluta*. La temperatura del ghiaccio fondente in tale scala è data da *273*. In generale, indicando con t la temperatura nella scala ordinaria e con θ la temperatura assoluta corrispondente, potremo scrivere

$$\theta = 273 + t. \qquad (12)$$

106 — Calore specifico di un gas a volume costante e a pressione costante. — La teoria cinetica dei gas conduce ad un' altra importante conseguenza, che l' esperienza conferma pienamente. Supponiamo di scaldare il gas contenuto nel cilindro considerato nel § 104 (fig. 61), impedendo al gas di dilatarsi, ciò che si potrebbe ottenere aumentando continuamente la pressione sullo stantuffo. Per ogni grammo di gas e per ogni grado di temperatura, occorrerà una certa quantità di calore, che sarà il *calore specifico del gas a volume costante*.

In tal caso il lavoro esterno è nullo, e il calore sarà semplicemente impiegato ad aumentare la forza viva media delle molecole del gas, ossia la sua temperatura.

Se invece permettiamo allo stantuffo di salire, mantenendo costante la pressione, il calore, oltre che accrescere la velocità molecolare, dovrà compiere il lavoro d' innalzamento dei pesi che gravano sullo stantuffo.

In tal caso per riscaldare di un grado un grammo di gas, occorrerà una quantità di calore maggiore di prima; quindi *il calore specifico di un gas a pressione costante è maggiore di quello a volume costante.*

La differenza tra i due calori specifici equivale al lavoro compiuto nella dilatazione del gas. Da tale differenza Mayer potè calcolare l' equivalente meccanico del calore prima ancora che Joule lo determinasse sperimentalmente. I due valori coincidono, e questo rafforza assai la teoria cinetica del calore.

Macchine a vapore.

107 — Il modo più pratico di trasformazione del calore in lavoro si ha nelle *macchine a vapore*.

Ogni macchina a vapore consta di tre parti, che sono: la *caldaia*, il *cilindro*, e il *condensatore* o *refrigerante*.

La *caldaia* è un recipiente che può resistere ad alte pressioni — dalle 5 alle 20 atmosfere — e che contiene acqua, la quale viene scaldata e può raggiungere temperature superiori a 100°, perchè è tenuta sotto forte pressione dal proprio vapore. Il vapor d' acqua della caldaia passa, mediante una tubatura *T*, nel *cilindro* (fig. 62), cioè in un cilindro metallico a pareti robuste, nel quale può scorrere a tenuta uno stantuffo *P*, guidato da un' asta di acciaio *c*, scorrente, a perfetta tenuta, in appositi fori. Dal cilindro il vapore passa poi, mediante una seconda tubatura *R*, nel *condensatore*, ove viene a contatto con un corpo freddo, di solito acqua.

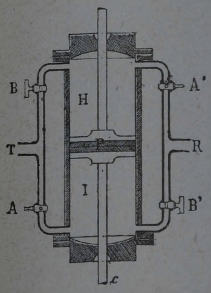


Fig. 62

Il modo di agire è il seguente. Ad un dato momento si aprono le valvole *A* e *A'*: allora nella concamerazione *I* si

ha la pressione del vapore della caldaia, e nell' altra concamerazione, H, quella, molto più piccola, del vapore nel refrigerante. Lo stantuffo P viene in conseguenza spinto in su, mentre il vapore della concamerazione H può liberamente uscire per la valvola A' e passare nel condensatore. Quando lo stantuffo P ha raggiunto l' estremo limite della corsa, si chiudono A e A' e si aprono invece B e B'. Allora nella concamerazione H il vapore ha la stessa pressione che in caldaia, mentre quello della concamerazione I, venendo nel refrigerante, si condensa, abbassando notevolmente la propria pressione, talvolta al di sotto di quella atmosferica. Lo stantuffo perciò torna indietro; e così di seguito.

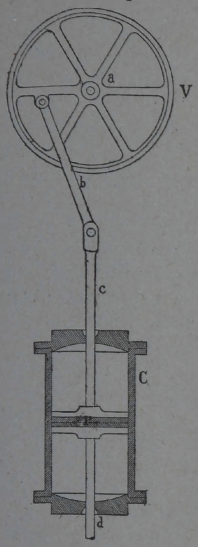


Fig. 63

Il movimento di va e vieni dello stantuffo si trasforma per lo più in moto circolare per mezzo di una *biella* b (fig. 63) articolata da una parte alla *candela* c d, e dall' altra al *volano* V.

In alcune macchine il refrigerante manca; in questo caso il vapore esce liberamente nell' aria atmosferica. Meglio sarebbe dire che il refrigerante è l' aria stessa.

108 — **Macchine ad espansione.** — In alcune macchine il cilindro rimane in comunicazione con la caldaia durante l' intera corsa dello stantuffo: in altre, più perfezionate, soltanto durante una parte, per es. la metà, un terzo e talvolta solo un decimo della corsa, il rimanente della quale si compie per la espansione del vapore entrato nel cilindro. Queste macchine si dicono *ad espansione*. In esse il vapore, durante l' espansione, compie lavoro a spese del calore che esso possiede: perciò si raffredda, e cede al refrigerante molto meno calore che nelle macchine senza espansione.

109 — **Distribuzione a cassetto.** — Si usa ancora, in alcune macchine, specialmente in quelle di marina, la *distribuzione*

a cassetto. Il vapore arriva dalla caldaia in una scatola chiusa chiamata *cassetto*, nella quale scorre un pezzo detto *cassettino*.

Per una delle posizioni che il cassettino prende (fig. 64), uno (*C*) dei compartimenti in cui lo stantuffo divide il cilindro, è posto in comunicazione con la caldaia, mentre l'altro com-

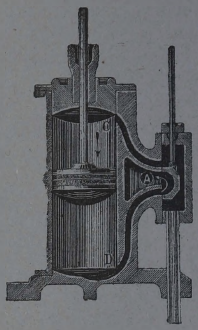


Fig. 64

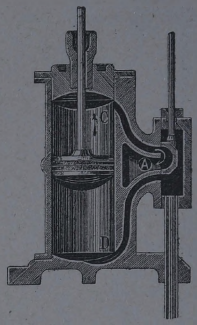


Fig. 65

partimento (*D*), mediante un orifizio *A* (*scappamento*), praticato nelle pareti del cilindro, si trova in comunicazione col refrigerante.

Per l'altra posizione presa dal cassettino (fig. 65), le comunicazioni sono invertite: si ha così il movimento di va e vieni dello stantuffo.

Come siano connessi fra loro il cassettino e lo stantuffo, si vede nella macchina seguente.

110 — Motrice fissa. — La figura 66 rappresenta una macchina verticale fissa con distribuzione a cassetto. Il vapore giunge pel tubo *L* nel cassetto *B B*, e viene distribuito nel cilindro *C* dal cassettino *a*, che si muove sulla piastra *R*. Il moto dello stantuffo fa rotare, mediante la *biella P* e la *manovella D*, l'asse *AA'*, detto *albero motore;* il quale, mediante l'*eccentrico E* e il *tirante Q*, imprime un movimento di va e vieni al cassettino *a* raccomandato alla *candela N*.

Una grossa ruota *V (volano)*, dotata di grande inerzia, assicura la continuazione del moto della macchina nelle due posizioni di ogni giro, nelle quali i pezzi *S* e *P* si trovano nel

piano verticale passante per l' asse AA'; ossia — come suol dirsi — nei *punti morti*.

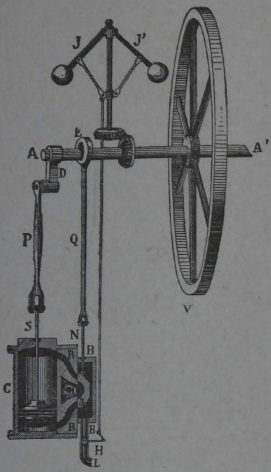


Fig. 66

Per regolare poi la velocità del motore, l' albero trasmette, per mezzo di un ingranaggio, un movimento di rotazione ad un parallelogrammo articolato JJ', che porta due pesanti sfere di metallo.

Quando la velocità cresce, per la forza centrifuga le due sfere si allontanano e si innalzano; e così il parallelogrammo fa muovere, mediante un tirante, una leva articolata H, la quale fa serrare sempre più la valvola di immissione del vapore nel cassetto BB. Invece, se la velocità diminuisce, la valvola viene aperta sempre di più; e così si ottiene un moto pressochè uniforme dell' albero motore.

Motori a scoppio.

111 — In questi ultimi tempi sono venuti in uso dei motori termici diversi dalle macchine a vapore, detti *a scoppio*, perchè la forza che in essi spinge lo stantuffo è dovuta all' esplosione di una miscela di un gas, o di un vapore, combustibile, e di aria. Nel loro schema essi sono costituiti da un cilindro T (fig. 67), munito di due valvole A, B, nel quale scorre a tenuta lo stantuffo C; il movimento di va e vieni dello stantuffo, come nella macchina a vapore, viene trasformato in moto circolare continuo.

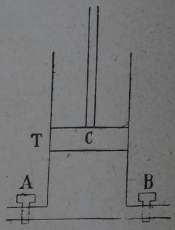


Fig. 67

Il funzionamento avviene in quattro tempi:

1° Lo stantuffo C si solleva per forze esterne, ed aspira dalla valvola A una miscela d' aria e del gas, o vapore,

combustibile (ordinariamente un idrocarburo), in tale rapporto che la combustione sia completa.

2° Lo stantuffo, abbassato da forze esterne, comprime la miscela ad una pressione di circa otto atmosfere.

3° Con un opportuno artifizio (per lo più mediante una scintilla elettrica) viene fatta esplodere, a questo punto, la miscela: essa, per l' elevata temperatura che allora si produce, acquista una notevole pressione e spinge in alto lo stantuffo.

4° Lo stantuffo è riportato indietro da forze esterne, e caccia dalla valvola *B* i prodotti della combustione.

Come si vede, il 1°, il 2° e il 4° tempo richiedono lavoro fatto da forze esterne; il solo 3° tempo fornisce lavoro motore.

È quindi necessario munire il motore di un volano, capace di raccogliere nella 3.ª fase la forza viva necessaria, sia per compiere il lavoro al quale è destinato il motore, sia per produrre l' aspirazione e la compressione della miscela, e cacciare i prodotti di combustione.

Un tale motore non si avvia da sè; l' avviamento deve esser fatto da un motore ausiliario, ordinariamente dal braccio dell' uomo, mediante una manovella.

Non possiamo entrare in maggiori particolari su questi motori adoperati ora in moltissime industrie, nei piccoli battelli, nelle automobili, e che hanno resa possibile e ormai pratica, la navigazione aerea coi dirigibili e cogli aeroplani; ma noteremo che i loro vantaggi principali sono: 1° di avere un rendimento praticamente superiore a quello delle macchine a vapore; 2° di essere, a potenza uguale, più leggeri di queste; 3° di poter essere usati nei casi in cui occorra di frequente l' interruzione del movimento, anche per non breve tempo, perchè per esser messi in moto non richiedono, come le macchine a vapore, un previo riscaldamento.

Sorgenti di calore.

112 — **Calore svolto dalle reazioni chimiche.** — Le principali sorgenti di calore, che servono per il riscaldamento e per far agire le nostre macchine, sono le combustioni. Il combustibile è generalmente un corpo organico, costituito in gran parte da carbonio e idrogeno: si porta il corpo alla temperatura di ignizione, e allora questi elementi si combinano più o meno rapidamente coll' ossigeno dell' aria, bruciando. Gli atomi del

carbonio e dell' idrogeno avevano inizialmente, in presenza degli atomi di ossigeno, una certa energia potenziale relativa all' *affinità chimica*; nei composti risultanti dalla combustione tale energia potenziale è assai minore, e la differenza corrisponde alla energia calorifica prodotta nella reazione.

Le combustioni, e più generalmente tutte le reazioni chimiche nelle quali si ha sviluppo di calore, si dicono reazioni *esotermiche;* altre reazioni nelle quali invece ha luogo assorbimento di calore, sono dette *endotermiche*. Il calore sviluppato o assorbito nelle reazioni chimiche è soggetto alle seguenti leggi, che l' esperienza ha dimostrato.

I) La quantità di calore sviluppata o assorbita, dipende anzitutto dalla qualità delle sostanze che hanno preso parte alla reazione; per data qualità, è proporzionale alla quantità di esse, ma è indipendente dal tempo in cui la reazione si è compiuta.

Così la combustione di 1 grammo d' idrogeno produce 34000 piccole calorie per ogni grammo di questo gas, tanto se brucia nell' ossigeno puro che nell' aria, per quanto la combustione sia nel primo caso molto più rapida che nel secondo.

II) Quando si può passare da un sistema di sostanze ad un altro mediante un' unica reazione, oppure con più reazioni successive, la quantità di calore sviluppata o assorbita è la stessa tanto se il passaggio ha luogo nel primo modo che nel secondo.

Per esempio: quando una certa quantità di carbone si combina colla quantità di ossigeno necessaria a formare anidride carbonica (CO_2), si ottiene un numero di calorie che è uguale alla somma di quelle che si producono formando prima, con quella quantità di carbone e con metà dell' ossigeno, dell' ossido di carbonio (CO), e poi, con questo e coll' altra metà dell' ossigeno, l' anidride carbonica (CO_2).

III) Per decomporre il composto ottenuto da una data reazione esotermica è necessario spender tanto calore quanto se n' è svolto nella reazione stessa, oppure somministrare al corpo energia di altra specie, in quantità equivalente a quel calore.

113 — **Calore animale.** — Anche la temperatura, più elevata di quella dell' ambiente, posseduta dai mammiferi e dagli uccelli, è dovuta a calore sviluppato dalle reazioni chimiche, e principalmente dall' ossidazione del carbonio e dell' idrogeno.

Ricerche molto accurate di fisiologia dimostrano, infatti, che la quantità di calore svolta in un animale corrisponde

precisamente a quella che producono le reazioni chimiche colle quali si passa, dalle sostanze introdotte colla nutrizione e colla respirazione, alle sostanze in vario modo eliminate dall' organismo.

Tale calore in parte serve a compensare quello che l' animale cede di continuo all' ambiente, ch' è più freddo, in parte va impiegato nell' evaporazione del sudore alla superficie del corpo e dell' acqua del sangue nei polmoni, e in parte infine va trasformato nel lavoro meccanico compiuto dall' animale. Cosicchè quando questo vive in un ambiente molto freddo, od eseguisce molto lavoro meccanico coi suoi muscoli, allora ha bisogno di una maggior quantità di cibo e consuma in maggior abbondanza l' ossigeno atmosferico.

114 — **Calore solare.** — Però la sorgente di calore più importante per la vita alla superficie terrestre è il sole. La quantità di calore che tale astro invia sulla terra è enorme, e si può determinare mediante apparecchi chiamati *piroeliometri*.

Il primo piroeliometro, quello *di Pouillet*, è costituito da una scatola d' argento a pareti sottili, una delle quali, affumicata, si rivolge normalmente ai raggi del sole (fig. 68). In questa scatola *calorimetrica* è contenuto un peso noto di acqua, e vi sta immerso il bulbo di un termometro. Dall' innalzamento di temperatura che si ottiene per l' esposizione ai raggi solari in un tempo determinato, si può ricavare la quantità di calore che ha colpito la superficie affumicata del piroeliometro, purchè si tenga conto del calore irraggiato in quel tempo dall' apparecchio.

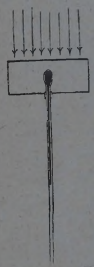


Fig. 68

Per avere poi la quantità di calore che il sole invia verso la superficie suddetta, occorre naturalmente tener conto anche dell' assorbimento dell' atmosfera, il quale dipende da circostanze svariate.

Così il Pouillet trovò che il sole invia sulla superficie di 1 centimetro quadrato sulla terra, disposto perpendicolarmente ai raggi, 1,76 piccole calorie al minuto. Le determinazioni posteriori, fatte con altri piroeliometri, hanno dato, per la così detta *costante solare*, cioè per il numero di piccole calorie che il sole manda perpendicolarmente su di 1 cm.^{2} posto ad una distanza dal sole uguale a quella della terra, un valore più

grande, circa 3. Moltiplicando questo numero per l'area, in centimetri quadrati, della superficie sferica avente per centro il sole e per raggio la distanza da esso alla terra, si ottiene il numero di piccole calorie che il sole emette tutt'intorno a sè in 1 minuto, numero che risulta uguale a $8{,}4 \times 10^{27}$.

Sebbene il sole emetta tante calorie al minuto, non dà segno di raffreddamento, chè dai tempi storici più remoti non è cambiata la flora e la fauna sulla terra: dunque in esso si deve riprodurre sempre, ogni minuto, quel numero straordinariamente grande di calorie.

D' altra parte, tutte le teorie chimiche proposte per spiegare una così enorme produzione di calore riescono in difetto. Si è calcolato che, anche se tutta la massa del sole fosse composta di puro idrogeno e ossigeno, nelle proporzioni necessarie ad una combustione completa, il calore solare si sarebbe già da molto tempo esaurito per il suo irraggiamento. Helmholtz quindi propose una nuova teoria, che i calcoli di Thomson confermarono pienamente. Secondo tale teoria, la massa solare andrebbe tuttora condensandosi: ne seguirebbe una diminuzione dell' energia potenziale di attrazione e lo sviluppo di una quantità equivalente di calore, che basterebbe a risarcire le perdite dovute all' irraggiamento. Il rimpiccolimento del diametro solare, che ne seguirebbe, risulta dai calcoli così esiguo, da sfuggire alle più accurate misure per un gran numero di secoli. Cade dunque l' obiezione della costanza del diametro solare, che si potrebbe fare a quella teoria.

NOZIONI DI METEOROLOGIA

115 — Un' interessante applicazione delle leggi fisiche, da noi esposte fin qui, si ha nell' indagine di quei fenomeni, che si svolgono nella nostra atmosfera, e che costituiscono quel ramo delle scienze naturali che si chiama *meteorologia*.

Qui diremo brevemente dello stato termico dell' atmosfera e dei movimenti atmosferici che ne dipendono, dell' umidità atmosferica e delle meteore acquee, che per essa si hanno: delle meteore ottiche ed elettriche parleremo in seguito.

Stato termico dell' atmosfera.

116 — Nell' interno del nostro pianeta esiste presumibilmente una temperatura elevatissima: però, a causa della cattiva conduttività termica dello strato solido superficiale, il calore interno della terra non ha influenza sensibile sulle variazioni della temperatura nell' atmosfera, le quali son dovute unicamente al calore irraggiato dal sole.

Si comprende quindi agevolmente come la temperatura dell' atmosfera varî colle ore del giorno, colle stagioni, e colla latitudine dei luoghi, cioè colla inclinazione sotto la quale la terra riceve i raggi solari.

La temperatura dell' aria diminuisce al crescere dell' altitudine: ciò deriva dalla proprietà che ha l' aria d' essere trasparente per il calore raggiante, di non riscaldarsi che insensibilmente per influenza diretta del calore. Il riscaldamento dell' aria

avviene soltanto per il suo contatto colla superficie terrestre, e il calore si trasmette dagli strati inferiori ai superiori per convezione.

L'atmosfera subisce poi un raffreddamento continuo per l'irraggiamento nello spazio, raffreddamento il quale è sempre maggiore via via che aumenta l'altitudine, perchè va man mano diminuendo lo strato d'aria sovrastante, che modera gli scambi di calore cogli spazi interplanetari, ove la temperatura è molto bassa (presumibilmente al disotto di —150°).

117 — **Periodo diurno della temperatura.** — Osservando a brevi intervalli di tempo, durante un'intera giornata, un termometro posto all'ombra, all'aperto, si riconosce che ogni giorno la temperatura, dalle prime ore del mattino, va innalzandosi fin dopo mezzodì, e che poi comincia a decrescere, e diminuisce fino al mattino seguente. Si ha così ogni giorno un *massimo* ed un *minimo* di temperatura: il minimo circa alla levata del sole, il massimo circa due ore dopo il passaggio del sole al meridiano, un po' più presto d'inverno, un po' più tardi d'estate.

È facile renderci conto di questo periodo. La terra cede continuamente, per irraggiamento e per convezione, il calore ricevuto dal sole; durante la notte la perdita di calore avviene senza il compenso del riscaldamento solare, perciò l'abbassamento di temperatura è progressivo fino alla mattina, cioè fino a quando i primi raggi solari non giungono a sfiorare il suolo. Coll'innalzarsi del sole sull'orizzonte, l'obliquità dei raggi diminuisce, perciò cresce la quantità di calore ricevuta da una data superficie AB (fig. 69). Infatti, la quantità di calore che cade su AB — supponiamo in un minuto secondo — è quella portata dal fascio di raggi solari ABM, ed essa è tanto più grande, quanto è maggiore la sezione retta di questo fascio, ossia quanto minore è l'angolo che i raggi formano colla normale alla superficie stessa, cioè quanto più il sole è alto sull'orizzonte.

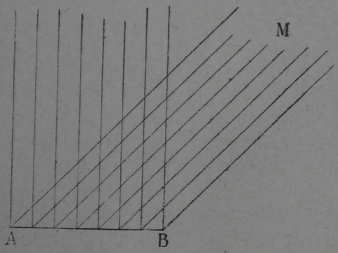


Fig. 69

Dalla levata del sole a mezzodì, il calore ricevuto dal suolo, in ogni secondo, per effetto dei raggi solari, va dunque crescendo; e poichè supera la perdita di calore che quello e gli strati atmosferici inferiori subiscono per l'irraggiamento e la convezione, la temperatura va aumentando. Dopo mezzodì la quantità di calore ricevuto comincia, è vero, a diminuire, mentre quella perduta continua a crescere, ma, poichè la prima supera ancora la seconda, la temperatura continua ad aumentare, finchè esse non divengono uguali: soltanto allora la temperatura comincia a diminuire e si ha il massimo, il quale ha luogo quindi alquanto dopo il mezzodì.

In seguito, la quantità di calore ricevuto in ogni secondo, che va continuamente scemando coll'altezza del sole sull'orizzonte, non basta più a compensare le perdite, e la temperatura si abbassa. Dal tramonto, sino alla levata successiva del sole, la quantità di calore ricevuta è nulla, mentre le perdite continuano, sebbene in misura sempre minore: onde la temperatura continua ad abbassarsi e si abbassa finchè la terra non riceve, ogni secondo, quanto perde nello stesso tempo; allora si ha il minimo della temperatura, che dovrebbe accadere perciò un po' dopo la levata del sole, e che infatti, in media nell'anno, avviene alcuni minuti dopo il sorgere di quest'astro.

118 — **Temperatura media.** — Se durante la giornata, a brevi intervalli di tempo, ad es. di un'ora, si misura la temperatura dell'atmosfera e si fa la media di questi risultati, si ha la *temperatura media del giorno*. In pratica, per avere questa media, si fanno soltanto poche osservazioni ad ore determinate, che l'esperienza indica come più convenienti per ottenere un risultato poco diverso dal vero. Negli osservatori ita-

Fig. 70

liani, ad esempio, tale media si ricava facendo la somma della temperatura massima, della temperatura minima, della temperatura alle *9* e di quella alle *21*, e dividendo la somma per *4*.

La temperatura massima e minima vengono date da termometri di costruzione speciale.

Il *termometro a massima* (fig. 70) contiene mercurio, vien disposto orizzontalmente, o alquanto inclinato in modo

che il bulbo sia più in basso, ed ha il cannello un po' curvato e strozzato in *s* in prossimità del bulbo. Con questo artificio, il mercurio può dilatarsi liberamente, ma non può tornare indietro nella contrazione: il filetto di mercurio del cannello si stacca in tal caso dalla rimanente massa e resta ad indicare la temperatura massima raggiunta. Raddrizzando il termometro, mediante piccole scosse, si può fare scendere di nuovo il mercurio e unirlo a quello del bulbo.

Il *termometro a minima* (fig. 71) si tiene anch'esso orizzontale e contiene alcool, nel quale è immerso un cilindretto

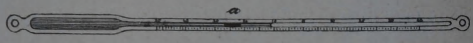


Fig. 71

di smalto *a*. Quando l'alcool si dilata, il cilindretto rimane al suo posto, ma quando l'alcool si contrae, il cilindretto viene tirato indietro dalla tensione superficiale del menisco. Per metterlo a segno, bisogna capovolgere l'istrumento fino a condurre l'indice in contatto colla superficie libera dell'alcool.

Ora, facendo la media delle temperature medie diurne di tutti i giorni di un mese, si ha la *media mensile:* e la media delle dodici temperature medie mensili ci dà la *media annuale.*

La media di parecchie medie annuali dà poi la *temperatura media del luogo.*

119 — **Periodo annuo.** — Pei luoghi che non siano situati in prossimità dell'equatore terrestre, la temperatura media diurna, nel nostro emisfero, comincia a crescere dopo la prima metà di gennaio. L'aumento, che da principio è lento, si fa rapido in aprile e maggio, e si ha un massimo verso la fine di luglio.

La temperatura di poi decresce lentamente l'agosto e il settembre, indi rapidamente, fino ad un minimo a metà di gennaio.

Nell'emisfero australe il massimo e il minimo sono invertiti.

120 — **Linee isotermiche.** — Ora consideriamo i luoghi che durante una giornata hanno avuto la stessa temperatura media.

Ad esempio: il 26 novembre 1910, Limoges, Cette, Bastia, Porto Ferraio, Foggia, Potenza, Cosenza, Salonicco, hanno avuto

tutti la temperatura di 10°; essi si trovano situati su di una curva (fig. 72), che dicesi *isoterma*. Un' altra isoterma è quella su cui giacciono Le Mans, Tours, Livorno, Camerino ecc., che hanno avuto la temperatura di 8°.

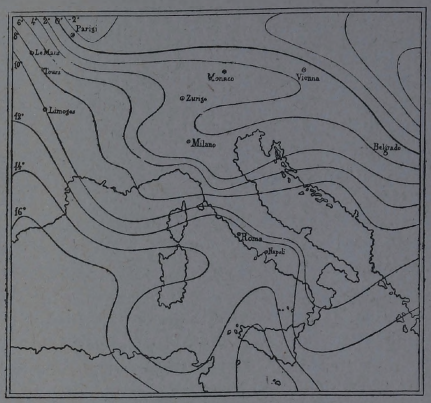


Fig. 72

Tracciando così su di una carta geografica di una regione un sistema di linee isotermiche, si vede a colpo d' occhio, come mostra la figura, quale sia stata, nei diversi punti di quella regione, la temperatura in uno stesso giorno; l' influenza su di essa della latitudine, dei mari, dei monti, ecc.

Le linee isotermiche però non sempre sono riferite alla temperatura *media diurna*, poichè giova, nello studio dei climi, conoscere anche quelle relative alla *temperatura media mensile* ed *aunuale*.

Infatti, molti paesi, i quali hanno la stessa temperatura media durante l' *inverno*, hanno temperatura media diversa nell' *estate*.

Si considera perciò la temperatura media dei mesi estivi e quella dei mesi invernali. Le linee isotermiche corrispondenti prendono il nome di *isotere* se si riferiscono all' estate, *isochimeniche* se all' inverno.

Movimenti atmosferici.

121 — L'atmosfera terrestre non è mai assolutamente tranquilla, ma è mossa di continuo da correnti d'aria più o meno intense, che possono assumere le più svariate direzioni. Queste correnti si designano col termine generico di *venti*.

Sappiamo (Vol. I, § 225) che la direzione del vento in una data regione dipende dalla distribuzione della pressione atmosferica, ed abbiamo anche appreso a dedurre la probabile direzione del vento dal diagramma delle isobare. Ora, la causa delle differenze di pressione, e perciò del vento, è di solito da attribuirsi all'ineguale distribuzione della temperatura, per la quale si producono correnti di convezione (§ 53) nell'aria inegualmente scaldata.

In circostanze speciali, la superficie della terra in un dato luogo si riscalda più che nei luoghi circostanti, e si riscalda allora in quel luogo, più che nei circostanti, l'aria vicino al suolo. Questa, dilatandosi, sale quindi verso l'alto formando una corrente ascendente, la quale ne determina naturalmente una discendente nei luoghi più freddi circostanti. In questi ultimi si avrà una pressione maggiore, e da essi l'aria accorrerà verso il luogo più caldo. La circolazione si manterrà fintanto che, per gli scambi, non sarà modificata la distribuzione delle temperature.

122 — **Venti alisei.** — Riesce facile ora spiegare il carattere regolare di certi venti.

Per es., è noto che, nella regione compresa tra l'equatore e il 30° parallelo, nell'emisfero boreale spira costantemente un vento con direzione di *nord-est*, mentre nell'emisfero australe, tra i medesimi limiti di latitudine, spira un vento con direzione costante di *sud-est*. Sono questi i cosiddetti *alisei*.

Nella regione equatoriale *EE* (fig. 73) il riscaldamento del sole, infatti, è maggiore che in tutte le regioni circostanti; si avrà dunque in questa regione una corrente ascensionale.

Negli strati superiori dell'aria la corrente si divide in due: una diretta verso il nord nell'emisfero nord, l'altra verso il sud nell'altro. L'aria partecipa alla rotazione terrestre, essendo pesante, cioè attratta dalla terra. Senonchè quella proveniente

dall'equatore possiede una velocità diretta da occidente ad oriente pari a quella degli oggetti situati all'equatore, e, per il principio di inerzia, tende a mantenerla. Gli oggetti situati a latitudini più alte posseggono anch'essi una velocità diretta verso oriente, ma minore, poichè in un tempo uguale descrivono un cerchio di raggio più piccolo.

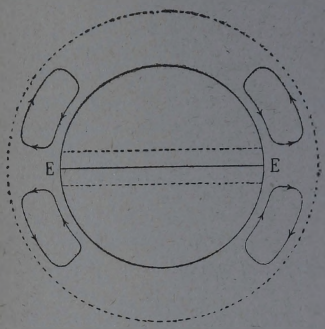


Fig. 73

L'aria perciò che giunge dall'equatore avrà una velocità da occidente ad oriente più grande: quindi negli strati superiori dell'atmosfera si avranno venti di sud-ovest nel nostro emisfero, e di nord-ovest nell'altro (*alisei superiori*).

Per ragioni analoghe la corrente fredda che si produce negli strati bassi dai poli verso l'equatore, darà luogo a venti di nord-est nel nostro emisfero, e di sud-est nell'altro (*alisei inferiori* o semplicemente *alisei*).

123 — **Brezze.** — Altri venti che pure soffiano con regolarità, ma la cui direzione periodicamente si muta nella opposta, sono le *brezze*. Sulle coste del mare, con maggior forza nei paesi più caldi, e meno intensamente nei più freddi, poco dopo la levata del sole comincia a spirare un vento dal mare (*brezza di mare*), che va via via rinforzandosi fino alle tre del pomeriggio. A quell'ora il vento comincia a decrescere, e cessa del tutto la sera.

Dopo il tramonto, invece, si leva un vento proveniente da terra (*brezza di terra*), che va rinforzandosi fino a due o tre ore dopo mezzanotte, poi diminuisce, e diventa debolissimo o cessa poco prima della levata del sole.

Le brezze sono dovute alla diversità di temperatura tra il suolo e il mare. Il suolo, che, come tutti i solidi, ha un calore specifico minore di quello dell'acqua, si scalda di giorno più della superficie del mare, ove la temperatura è ancora abbassata per effetto dell'evaporazione. Quindi, di giorno, la corrente dell'aria, negli strati bassi, è diretta dal mare verso terra.

Di notte il suolo si raffredda di più che il mare, e perciò la corrente ha la direzione opposta.

124 — **Monsoni.** — Vi hanno infine altri venti periodici importantissimi, detti *monsoni*, i quali spirano nel litorale asiatico che fronteggia l'*Oceano indiano* e il *Mar della Cina*, dal mare nella primavera e nell'estate, e da terra nell'autunno e nell'inverno.

Essi sono originati dal fatto che, durante l'estate, il versante a sud dell'Imalaia si riscalda fortemente, e si produce così una forte corrente diretta dal mare alla terra. Durante l'inverno, il continente si raffredda più del mare, e quindi il monsone spira da terra.

Umidità atmosferica.

125 — **Umidità assoluta e umidità relativa.** — Il vapore, che per l'azione del riscaldamento solare si solleva dall'enorme massa d'acqua sparsa sulla superficie terrestre, si diffonde nell'atmosfera e la rende più o meno umida.

La quantità d'acqua, in grammi, contenuta in un metro cubo d'aria, in un dato luogo e in un dato momento, si chiama *umidità assoluta*.

Essa d'ordinario si calcola indirettamente dalla pressione esercitata, in quel luogo e in quel momento, dal vapore acqueo dell'aria. Infatti, si deduce facilmente che il peso m, in grammi, di un metro cubo di vapor d'acqua che abbia la temperatura t e la pressione di e millimetri di mercurio, è dato da

$$m = 1{,}0582 \frac{e}{1 + 0{,}00367 \, . \, t} \, .$$

Questa formula vale anche se il vapor d'acqua è mescolato con altri gas, purchè e allora rappresenti la pressione parziale esercitata dal vapor d'acqua in seno alla mescolanza gassosa. Basterà quindi determinare tale tensione per avere il valore di m.

L'atmosfera in un luogo qualunque non è di solito satura di vapore acqueo, e perciò la quantità m è minore della quantità M, che, alla stessa temperatura t, sarebbe contenuta in un metro cubo d'aria se il vapore fosse saturo. Orbene, si chiama

umidità relativa, o *stato igrometrico*, il rapporto $\frac{m}{M}$.

Quanto è minore la umidità relativa, tanto più il vapore acqueo dell'atmosfera dista dal punto di saturazione, e l'evaporazione in seno all'aria avviene più facilmente. Ossia il tempo è più o meno umido secondochè è maggiore o minore l'umidità relativa.

126 — **Igrometria.** — Il rapporto $\frac{m}{M}$, che dà l'umidità relativa, è assai vicino al rapporto $\frac{e}{E}$ fra la tensione effettiva del vapore alla temperatura t, e la tensione massima E del vapore alla stessa temperatura. Infatti, i vapori non saturi soddisfano approssimativamente alla legge di Boyle, secondo la quale la densità assoluta di un aeriforme, ossia il suo peso per ogni unità di volume, è, a temperatura costante, proporzionale alla pressione.

Quindi lo stato igrometrico in un dato luogo si può ottenere determinando i valori di e e di E.

Ora, il valore della tensione E del vapore saturo alla temperatura t del luogo in quel momento, si trova in tabelle — costruite colla massima esattezza per opera sopratutto di Regnault — nelle quali, per ogni valore della temperatura, è dato il corrispondente valore della tensione massima del vapor d'acqua.

Per trovare poi e basta raffreddare gradatamente una lamina ben tersa finchè non la si veda appannarsi. L'appannamento è dovuto alla deposizione di goccioline di acqua, formate dal vapore che si trova nell'aria a piccolissima distanza dalla lamina, e che quindi possiede la temperatura della lamina stessa. Ciò significa che detta aria, alla temperatura t' della lamina, nel momento preciso in cui questa si appanna, è satura di vapor d'acqua. Il valore della tensione del vapore acqueo saturo alla temperatura t' si trova nelle tabelle sopra ricordate, in corrispondenza di questa temperatura, ed esso non è altro che il valore e della pressione effettiva del vapore nell'atmosfera, in virtù del principio della parete fredda (§ 80).

127 — **Igrometro di Regnault.** — Per fare la misura di $\frac{e}{E}$ in buone condizioni, si può ricorrere ad apparecchi speciali, a cui si è dato il nome di *igrometri a condensazione*.

Il primo di essi è dovuto al Daniell, ma migliore è quello del Regnault. Esso è formato da due ditali A, B (fig. 74), di argento ben terso, i quali contengono i bulbi di due termometri. Nel ditale B si pone un po' di etere solforico, attraverso il quale si fa gorgogliare dell' aria mediante un cannello C: l' evaporazione rapida dell' etere determina allora un abbassamento progressivo di temperatura nel ditale, e in conseguenza nell' aria in contatto con esso, finchè si ha l' appannamento, ossia finchè si raggiunge la temperatura di saturazione t'.

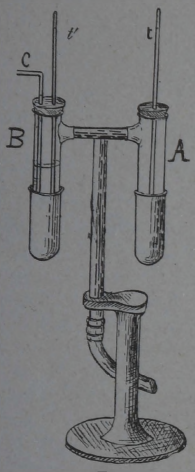


Fig. 74

Per determinare questa temperatura con molta precisione, si legge, sul termometro immerso nel ditale B, la temperatura θ a cui si vede comparire l' appannamento: essa sarà evidentemente un poco più bassa della temperatura t'. Indi si cessa il raffreddamento e si legge la temperatura θ' alla quale la rugiada scompare: la nuova temperatura sarà alquanto superiore a t'. La media $\frac{\theta + \theta'}{2}$ sarà, con buona approssimazione, la temperatura t' di saturazione cercata, di fronte alla quale si troverà nelle tabelle il valore di e.

Il termometro collocato nel ditale A dà la temperatura t dell' ambiente al momento della determinazione, e quindi serve ad avere dalle tabelle il valore di E.

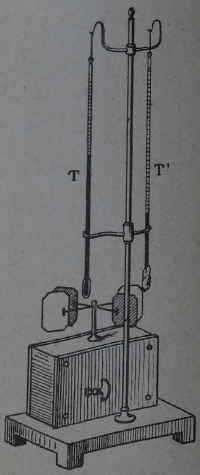


Fig. 75

128 — **Psicrometro**. — Ma negli osservatori meteorologici l' umidità atmosferica si suole oggidì determinare collo *psicrometro*. Esso è costituito da due termometri T, T' (fig. 75) di cui uno, T', ha il bulbo coperto di tela, che, per fare le determinazioni, si bagna di

acqua. Questa evaporando raffredda il bulbo, mentre l'ambiente gli rifornisce calore. Quando la perdita e il guadagno son giunti a compensarsi, la colonna di T' diventa stazionaria; dalle indicazioni dei due termometri si ricava allora, mediante apposite tabelle, i valori dell'umidità assoluta e dell'umidità relativa.

Per accelerare l'evaporazione, un meccanismo d'orologeria fa ruotare sotto ai bulbi un agitatore ad alette, nel senso che va dal termometro asciutto verso quello bagnato.

129 — **Igrometro di Saussure.** — Si ottiene una misura grossolana dell'umidità relativa anche con altri apparecchi, fondati sulla proprietà che hanno certi corpi di natura organica — quali le corde da violino, le fibre legnose, i capelli — di allungarsi per l'umidità. Essi sono detti *igrometri ad assorbimento*.

Il Saussure ne costruì per il primo uno *a capello*, costituito appunto da un capello, ben digrassato, teso verticalmente lungo un apposito sostegno (fig. 76). Una estremità del capello è fissata alla sommità del sostegno, e l'altro capo si avvolge su di una piccola puleggia: un contrappeso, che tende a far ruotare la puleggia in senso contrario a quello in cui la fa girare la tensione del capello, serve a mantenere teso questo. Un indice solidale con la puleggia, e mobile di fronte ad un quadrante graduato, segna i movimenti della puleggia stessa e quindi gli allungamenti o accorciamenti del capello.

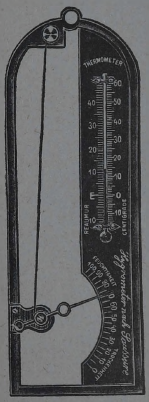


Fig. 76

L'apparecchio, si gradua ordinariamente in un modo tutto convenzionale: perchè possa poi servire da igrometro propriamente detto, è necessario preparare una tabella di ragguaglio, che dia i valori dell'umidità relativa in corrispondenza ai diversi punti della scala. Tale tabella non è la stessa per i diversi igrometri a capello, e, per uno stesso igrometro, deve esser rifatta di quando in quando, a causa delle alterazioni che subisce il capello.

Con pezzetti di corda da violino, od altre fibre organiche, si costruiscono, come tutti sanno, svariati giocattoli che servono da indicatori di umidità: notissima la figura del frate che si incappuccia quando il tempo è umido.

Meteore acquee.

130 — Quando l'atmosfera si raffredda fino a temperatura inferiore a quella a cui è saturo il vapore d'acqua in essa contenuto, l'acqua si deposita in goccioline, che in generale hanno per nucleo un granello di pulviscolo. La presenza dei granelli di pulviscolo — a meno che non si verifichino fenomeni elettrici, di cui in seguito dovremo occuparci — è necessaria per la formazione delle goccie d'acqua.

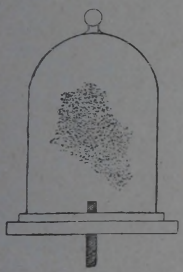


Fig. 77

Infatti, facciamo rapidamente il vuoto sotto la campana di una macchina pneumatica. L'aria espandendosi, e vincendo in quest'espansione la pressione atmosferica, si raffredda (§ 104), e il vapor d'acqua si condensa, formando una specie di nebbia, come mostra la figura 77.

Questo succede perchè, se non si prendono speciali precauzioni, l'aria della campana contiene del pulviscolo.

Ma se nella campana facciamo arrivare dell'aria privata dal pulviscolo, per filtramento attraverso un tappo di ovatta, la nube non si forma più, per quanto si faccia rapidamente il vuoto.

Il fenomeno è dovuto a ciò che, secondo la forma della superficie di un liquido, varia la tensione del vapor saturo in presenza del liquido stesso. Così, la tensione del vapor saturo a contatto di una bacinella d'acqua, che ha una superficie piana, non è la stessa di quella del vapor saturo che si trova in vicinanza di una goccia, la quale ha una superficie curva. Nel primo caso è minore che nel secondo. La differenza è tanto più grande quanto è più piccolo il diametro della goccia; e per goccie di piccolissimo diametro, la tensione del vapor saturo in vicinanza è assai grande.

Ora, una goccia, che si formi in un ambiente privo di pulviscolo, ha da principio diametro estremamente piccolo. La tensione massima del vapore d'acqua in prossimità di questa goccia è allora assai grande, e perciò la condensazione del vapore non può continuare.

Quando invece l'aria è carica di pulviscolo atmosferico, su ogni granello si deposita uno straterello d'acqua, che va ingrossando: e si ha così una goccia di diametro più grande (fig. 78). La tensione massima del vapore non sale perciò a valori eccessivi, e la condensazione può proseguire sopra la goccia stessa. Questa ingrandisce fino al punto in cui la resistenza opposta dall'aria al suo movimento è vinta; e la goccia allora cade.

Fig. 78

131 — **Rugiada e brina.** — La deposizione del vapor acqueo atmosferico sotto forma di goccie avviene in differentissime maniere.

Dopo una giornata calda di primavera, o di estate, seguita da una notte serena, si trova, la mattina seguente, all'aperto, il suolo bagnato come di pioggia recente, e l'erba ricoperta da numerose goccioline. Sotto gli alberi e i luoghi coperti, invece, il suolo è asciutto. È il fenomeno della *rugiada*.

Durante la notte, il terreno ha perduto calore per irraggiamento; quindi la temperatura di esso e dell'aria in vicinanza può essere discesa sotto il punto di saturazione ed essersi avuta la deposizione di acqua. Nei luoghi coperti l'irraggiamento è molto diminuito dal riparo sovrapposto, il quale lascia poco passare — ed in parte rinvia verso il terreno — il calore raggiante, e perciò quivi la rugiada non si forma. Questo spiega anche come non si abbia la rugiada sotto un cielo coperto da nubi, le quali trattengono e riflettono buona parte del calore raggiante.

Se il raffreddamento discende al disotto della temperatura di congelazione, come succede nelle notti serene di autunno, la rugiada si solidifica in ghiaccio minutissimo, e si ha allora la *brina*.

132 — **Nebbia.** — Nei luoghi molto umidi, specialmente nell'autunno inoltrato, si forma la *nebbia*. Il paese sembra invaso come da un fumo umido, che bagna gli oggetti, senza che si abbia una vera e propria caduta di goccie d'acqua.

La nebbia è dovuta al raffreddamento di uno strato atmosferico di notevole altezza presso la terra. Essa risulta costituita da goccie d'acqua tanto minute, che ogni più debole

corrente d'aria e la resistenza che questa oppone al loro movimento, bastano a mantenerle sospese: si ammette che in media il diametro di queste goccioline sia di un cinquantesimo di millimetro.

La formazione della nebbia avviene per lo più nei due modi seguenti. Spesso una corrente d'aria calda, e quindi ricca di vapore acqueo, passa su di un terreno più freddo: allora può avvenire la condensazione del vapore che contiene.

Qualche altra volta — specialmente vicino ai laghi o ai paduli — la nebbia è dovuta all'evaporazione di una distesa d'acqua più calda, in un'atmosfera più fredda. Tale fenomeno ha luogo di solito in inverno: dalla superficie dell'acqua sembra che si sollevi una specie di fumo, come da un vaso d'acqua scaldato sul fuoco.

133 — Nubi. — Più spesso il raffreddamento, che dà luogo alla deposizione di goccie d'acqua, si verifica a sensibile altezza dal suolo. Si ha allora la formazione delle *nubi*, che offrono aspetti multiformi a tutti ben noti.

Tale formazione è molto favorita dai moti ascensionali dell'aria. Questa salendo ed espandendosi repentinamente, si raffredda al disotto del punto di saturazione del vapor d'acqua che trasporta con sè: si producono così innumerevoli goccioline che si rendono visibili perchè riflettono la luce in tutte le direzioni. Il loro insieme costituisce la nube.

Secondo le loro forme, le nubi vennero classificate in quattro categorie, che prendono il nome di *cirri*, *strati*, *cumuli* e *nembi*.

I *cirri* sono nubi bianche, senza ombre, esili, filamentose, somiglianti a piume. Esse si formano a grande altezza, e, per la temperatura molto bassa che regna in quelle regioni, si suppone che siano costituite di minutissimi cristalli di ghiaccio.

Gli *strati* sono nubi disposte a strati orizzontali (e da ciò il loro nome) nelle regioni basse dell'atmosfera, con poca diversità d'ombre e di luce. Il loro aspetto è quello di una nebbia vista da lontano; e si formano di preferenza la sera e la mattina durante la stagione autunnale.

I *cumuli* sono nubi di forma globulare, oscure nella parte inferiore e lucenti nella superiore. Esse si formano di solito in una regione dell'atmosfera, ove l'aria calda, che sale in alto, si dilata rapidamente: quest'aria allora si raffredda e il vapore d'acqua, di cui è carica, si condensa.

I cumuli sono frequenti perciò in estate e sotto i tropici.

I *nembi* sono nubi oscure, senza forme definite, a bordi stracciati, che denotano essere nubi prossime a risolversi in pioggia. Esse di solito sono sintomo di cattivo tempo persistente.

Oltre queste forme tipiche, si distinguono altre forme intermedie, cioè *cirro-cumuli*, *cirro-strati*, *cumulo-strati*, ecc.

134 — Pioggia. — Quando le goccie d'acqua, che formano la nube, si fanno troppo grosse per rimanere sospese, cadono, costituendo la *pioggia*.

La grandezza delle goccie varia secondo la velocità dei movimenti dell'aria. Se l'aria è in calma, ordinariamente la goccia ha un diametro di pochi decimi di millimetro. Se l'aria è dotata di un forte movimento, possono rimanere sospese goccie di dimensioni assai più grandi. Così è provato che basta una corrente ascensionale, la quale abbia la velocità di 3 metri al secondo, per sostenere goccie del diametro di circa quattro millimetri.

135 — Neve e grandine. — Quando infine la precipitazione del vapor d'acqua si compie al di sotto di zero gradi, l'acqua si solidifica e si forma la *neve* o la *grandine*.

La neve è costituita, come fa vedere il microscopio, dalla riunione di finissimi cristalli esagonali di ghiaccio, riuniti in stellette a 6 raggi, con diramazioni sempre ad angoli di 60° (fig. 79). La neve è la forma più comune sotto la quale precipita allo stato solido l'acqua contenuta nell'atmosfera.

Fig. 79

Una forma di precipitazione solida meno frequente è, invece, la *grandine*. Perchè essa possa formarsi occorrono speciali condizioni atmosferiche, non tutte perfettamente conosciute, e delle quali non è facile assegnare la ragione. Di solito la caduta della grandine è accompagnata da vento turbinoso e da potenti scariche elettriche.

Fig. 80

Quando si guarda colla lente un chicco di grandine sezionato (fig. 80), si vede al centro un nucleo di ghiaccio opaco

(occludente, cioè, numerose bollicine d'aria); attorno a questo nucleo si osservano numerosi strati concentrici, o meglio frammenti di strati, di ghiaccio trasparente.

In accordo con ciò, una delle più probabili spiegazioni della grandine è la seguente.

È da ritenere, per molte ragioni, che una massa di vapor d'acqua possa restare sospesa nelle regioni fredde dell'atmosfera allo stato di soprasaturazione (§ 79), anche al di sotto della temperatura di zero gradi; e che le goccie, le quali in seguito possono depositarsi, si possano mantenere allo stato di soprafusione (§ 59), molto al disotto della temperatura del ghiaccio fondente.

Ora, se in tali condizioni alcune delle goccie vengono a solidificarsi, formeranno cristalli di ghiaccio, i quali, venendo a contatto colle goccie soprafuse, le congeleranno, saldandole tra loro. Si avrà così la formazione del nucleo di ghiaccio — di costituzione irregolare — che si trova nell'interno del granulo di grandine. Gli strati concentrici di ghiaccio trasparente, attorno al nucleo, possono essere dovuti a goccie d'acqua soprafusa, che in seguito vengono a raccogliersi e quindi a congelare intorno alla prima formazione solida. Si spiega così l'aspetto a frammenti di strati, presentato dalla grandine: ogni frammento di strato sta a rappresentare una goccia. La forza che determina la riunione delle goccie al nucleo è di natura sconosciuta: molto probabilmente si tratta di azioni elettriche.

OTTICA

136 — Lo studio dei fenomeni da cui ci deriva la percezione a distanza delle forme e dei colori dei corpi, forma oggetto di quella parte della fisica, che vien chiamata *ottica*.

Innanzi tutto, l'esperienza più rudimentale ci insegna a distinguere i corpi che vediamo, in corpi *luminosi*, cioè visibili per se stessi, e in corpi *oscuri*, cioè visibili soltanto quando si trovano in presenza dei primi, nel qual caso si dicono *illuminati*. Così, ad esempio, è luminoso il sole, è illuminato un muro esposto al sole.

I corpi luminosi sono anche detti *sorgenti di luce*, designandosi col termine « luce » l'agente che li rende visibili.

Vi sono corpi che possono essere attraversati dalla luce, e corpi che non la lasciano passare: i primi si chiamano *trasparenti*, i secondi *opachi*.

Ma la trasparenza e l'opacità non sono mai assolute, e variano grandemente con lo spessore dei corpi: anche quelli più trasparenti, come l'acqua, divengono opachi se hanno spessore molto grande; ed i più opachi, come i metalli, lasciano passare la luce, se ridotti a piccolissimo spessore. Le foglie d'oro che si ottengono con l'arte del battiloro, lasciano vedere, colorato in verde, il sole attraverso ad esse.

Assorbimento, diffusione e riflessione della luce.

137 — In una stanza tenuta perfettamente all'oscuro facciamo entrare — attraverso un piccolo foro praticato in un'imposta — un fascetto di luce solare, il quale diviene visibile per i numerosi granellini di pulviscolo che illumina nel suo percorso.

Se sul cammino di questo fascio interponiamo un corpo nero, per esempio un cartone annerito col nerofumo, vediamo il fascio luminoso terminare bruscamente sulla supeficie del cartone, mentre gli oggetti della stanza rimangono quasi invisibili. Si dice quindi che il nerofumo *assorbe* quasi totalmente la luce che riceve.

Se invece facciamo cadere il fascio su di un foglio di carta bianca, tutti gli oggetti della stanza si illuminano, come per la presenza di un oggetto luminoso, che in ogni direzione mandi luce. Diciamo allora che la carta bianca *diffonde* la luce. Tale proprietà è posseduta, in maggiore o minor grado, da ogni oggetto a superficie scabra e non nera.

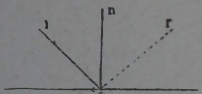


Fig. 81

Se infine il fascio *i o* (fig. 81) cade su di una lamina lucida ben tersa, vediamo che esso torna indietro in direzione *or*, e illumina soltanto gli oggetti che si trovano sul suo cammino. Si dice che la lastra *riflette* la luce.

138 — **Corpi translucidi.** — Fra i corpi che diffondono la luce, bisogna distinguere quelli che la mandano dalla sola parte da cui la ricevono, come fa il cartone bianco, e quelli che invece la inviano in tutte le direzioni, non solo dalla faccia rivolta alla sorgente luminosa, ma anche dalla faccia opposta. Questi ultimi corpi si chiamano *translucidi:* tali sono, ad es., il vetro smerigliato od opalino, l'alabastro, la carta bianca, ecc.

Propagazione rettilinea della luce.

139 — Abbiasi una piccola sorgente di luce, per es. un lume, e prendiamola di mira, da lontano, mediante un lungo

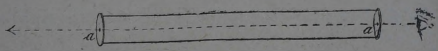


Fig. 82

tubo diritto, chiuso alle sue estremità con due schermi opachi aventi ciascuno un foro *a* disposto sull'asse del tubo (fig. 82).

Riconosciamo subito che la visione ha luogo soltanto se l'occhio e la sorgente luminosa si trovano sul prolungamento dell'asse.

Quindi concluderemo che *la luce si propaga in linea retta.*

140 — Ombra. — Avremo un'altra prova di tale propagazione rettilinea, ponendo una sorgente luminosa S (fig. 83), di piccola estensione (puntiforme), di fronte ad una parete bianca PQ (schermo), e collocando fra lo schermo e la sorgente un corpo M opaco. Vedremo tosto disegnarsi sullo schermo una

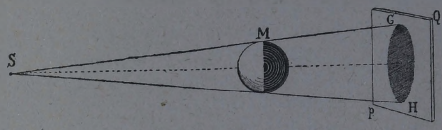


Fig. 83

macchia oscura, l'*ombra* del corpo. Ora, se immaginiamo condotte dal punto luminoso S tante rette che si appoggino al corpo opaco, il luogo dei punti G, H..., in cui queste rette incontrano lo schermo, è appunto il limite dell'ombra. Il che vuol dire che la luce, nel propagarsi, segue delle rette che partono dalla sorgente.

Le rette, come SH, che congiungono il punto luminoso S con un punto rischiarato, si chiamano *raggi luminosi.* Un raggio luminoso così definito non è niente di materiale, ma una pura concezione geometrica.

Chiamasi poi *pennello di luce* un sottil fascio di raggi partenti da un punto luminoso.

141 — Penombra. — Una conseguenza della propagazione rettilinea della luce, è la formazione delle penombre con sorgenti estese.

Così, se davanti a un disco luminoso — la cui sezione è rappresentata da AB nella figura 84 — poniamo un disco opaco DC e uno schermo $a'\,b'$, vedremo in ab una macchia circolare perfettamente oscura, e attorno a questa una corona circolare $ab'\,ba'$, di oscurità degradante dal contorno interno ab a quello esterno $a'\,b'$, al di là del quale si ha luce completa. Ciò perchè

i punti interni al cerchio ab non ricevono luce da alcun punto della sorgente, e quelli compresi tra i cerchi ab ed $a'b'$ sono invece illuminati da una parte della sorgente stessa: così il

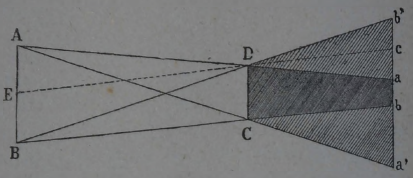


Fig. 84

punto c riceve luce da tutti i punti compresi tra E e A, non ne riceve invece affatto dai punti compresi tra E e B.

La regione ab, totalmente oscura, si chiama *ombra portata*; la parte sfumata, compresa fra i cerchi ab e $a'b'$, si chiama *penombra*. Ora, quando il corpo opaco, come nel caso della figura, è più piccolo del luminoso, l'ombra portata s'impiccolisce allontanando lo schermo, e diventa nulla al di là del punto in cui si riuniscono i raggi Aa e Bb, dopo il quale si ha solo la penombra. Quando, invece, il corpo opaco è più grande di quello luminoso, l'ombra portata si ingrandisce sempre allontanando lo schermo. In ambedue i casi poi, la penombra si allarga a mano a mano che cresce la distanza dello schermo dal corpo opaco.

142 — Ecclissi. — Quanto abbiamo detto sulla produzione delle ombre, ci spiega subito il fenomeno degli ecclissi.

Sia infatti AB il sole (fig. 85), e CD la luna, e immaginiamo le due superfici coniche $ABVHK$ ed $ABIPQ$, tangenti

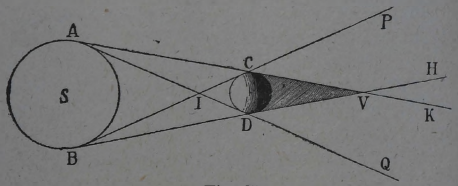


Fig. 85

esternamente ed internamente al sole e alla luna. Si avrà ombra nella porzione CVD del primo cono, e penombra in tutto il resto $PCDVQ$ del secondo cono.

Ora, se la terra sarà investita dall'ombra proiettata dalla luna, uno spettatore, che si trovi nel cono *CVD*, non vedrà affatto il sole; assisterà cioè ad un *ecclisse totale di sole*. Se si troverà nelle zone *PCVH* e *QDVK*, vedrà soltanto una parte del sole, e l'ecclisse sarà *parziale*. Infine, se si troverà nel cono *VHK*, vedrà il contorno del disco solare, e l'ecclisse sarà *anulare*.

Gli ecclissi di sole avvengono in quei novilunii, in cui il sole, la luna, e la terra si trovano quasi allineati.

Una spiegazione analoga si può dare per gli *ecclissi di luna*, che avvengono quando la luna entra nel cono d'ombra proiettato dalla terra, ossia in quei plenilunii in cui sole, terra e luna sono quasi sopra una medesima retta.

143 — **Immagini date dai piccoli fori.** — Praticando un piccolo foro in una lamina sottile, la quale chiuda la finestrella di una camera buia, noi vediamo sopra uno schermo opposto al foro, un'immagine rovesciata degli oggetti luminosi o illuminati posti all'esterno.

Ciò si spiega benissimo colla propagazione rettilinea della luce, e quindi ci dà di essa una nuova prova.

Infatti, i pennelli di luce partenti dai diversi punti di un oggetto esterno e aventi per sezione comune il foro, cadendo sopra lo schermo, illuminano delle piccole aree di figura simile al foro, le quali costituiscono col loro insieme una figura simile a quella dell'oggetto, ma capovolta, poichè i fascetti passando pel foro s'incrociano. Quanto più piccolo è il foro, tanto più netta, ma meno luminosa, apparisce l'immagine. La forma di esso però può essere qualunque, tanto che, ad es., se l'oggetto luminoso è il sole, la sua immagine è perfettamente circolare (se lo schermo è perpendicolare ai raggi, ed ellittica se obliquo), anche se il foro è triangolare, quadrato, ecc.

Fotometria.

144 — **Giudizio del nostro occhio.** — Ognuno di noi, dalla esperienza comune, è abituato a distinguere quando un oggetto è più o meno illuminato. Il nostro occhio però non ci consente di valutare senz'altro i rapporti tra le illuminazioni di due corpi, anche se identici. L'occhio ci permette soltanto di dire,

con buona approssimazione, quando è che due corpi — identici di forma e di colore, e posti vicini — sono *ugualmente illuminati* o, come dicesi scientificamente, quando è uguale la loro *intensità di illuminazione*, ossia la quantità di luce ricevuta dall'unità di superficie.

Prendiamo, infatti, due sorgenti luminose (fig. 86); una costituita da una candela, e l'altra da quattro candele; poniamole davanti ad una lastra di vetro smerigliato, disposta verticalmente, e facciamo in modo, con un opportuno tramezzo *M*, che la luce di ciascuna sorgente non possa illuminare che una metà del vetro stesso. Non sarà difficile, avvicinando o allontanando uno dei lumi dal vetro, dare alle due metà *A* e *B* un'uguale illuminazione. Basta allora il più piccolo spostamento di uno dei due lumi, perchè l'occhio posto al di dietro avverta una diversità d'illuminaziene fra *A* e *B*.

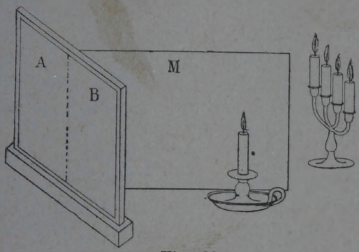


Fig. 86

145 — **Legge delle distanze.** — Questa esperienza ci dice anche che sorgenti diverse possono produrre la stessa illuminazione, quando si scelgano opportunamente le loro distanze dallo schermo illuminato.

Ora, noi conveniamo — come è naturale ammettere — che una sorgente, composta di *n* sorgenti luminose tutte uguali, sia *n volte più intensa* di ciascuna delle componenti, abbia cioè una *intensità luminosa*, o *potere illuminante*, *n* volte maggiore, inviando sopra l'unità di superficie, a parità di distanza, una quantità di luce *n* volte più grande. Così, nell'esperienza precedente, il secondo lume è quattro volte più intenso del primo, perchè è formato da quattro candele invece di una.

Perciò l'apparecchio della figura 86 può servirci per trovare come varii la illuminazione prodotta sopra uno schermo da una data sorgente, col cambiare della sua distanza da quello. A tale scopo, infatti, misuriamo le distanze dei due lumi dallo schermo, quando le due metà di esso sono ugualmente illuminate.

Troveremo che se il lume di una candela è posto a 50 cm. dallo schermo, l'altro è collocato a 1 metro; se invece è posto

a 25 cm., l'altro è collocato a 50 cm.; e così via: che cioè, costantenente, la distanza dallo schermo del lume di intensità quadrupla, deve essere doppia della distanza dell'altro, per produrre lo stesso effetto.

Se il 2.° lume sarà formato di nove candele, troveremo che dovrà essere posto a distanza dallo schermo tripla di quella del lume di un'unica candela, per produrre uguale illuminazione.

Dunque *le intensità luminose di due sorgenti che illuminano ugualmente uno schermo, son proporzionali al quadrato delle rispettive distanze dallo schermo.*

E viceversa, siccome per la convenzione da noi fatta un lume di 4, 9, ecc. candele illumina lo schermo 4, 9, ecc. volte più intensamente di una candela alla stessa distanza, il risultato precedente si può esprimere anche dicendo che *l'intensità d'illuminazione di uno schermo è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente.*

146 — Misura delle intensità delle sorgenti. — Della legge delle distanze trae partito la *fotometria*, che si propone di confrontare le intensità luminose di due sorgenti di luce. Se indichiamo con d_1 e d_2 le distanze delle sorgenti da uno schermo da esse ugualmente illuminato, il rapporto delle loro intensità $\frac{I_1}{I_2}$ sarà dato da $\frac{d^2_1}{d^2_2}$.

147 — Fotometro di Foucault. — Questo confronto si fa con strumenti chiamati *fotometri.*

Alcuni di essi altro non sono che opportune modificazioni del semplice apparecchio da noi adoperato al § 144, che è uno dei primi fotometri, quello del Bouguer. Fra le modificazioni di esso citeremo solo il *fotometro di Foucault*, in cui la lastra di vetro è translucida per uno strato di latte disseccato, e il tramezzo non arriva sino alla lastra, onde le due metà di questa non siano separate da una riga nera, che nuocerebbe per il giudizio della loro uguaglianza di illuminazione.

148 — Fotometro di Bunsen. — Un fotometro differente fu ideato dal *Bunsen*. Su di un telaietto *k* (fig. 87) è teso un foglio di carta con una macchia di stearina nel centro. La macchia è più trasparente e diffonde la luce meno della carta non unta; e quindi, allorchè una pagina del foglio viene illuminata

da una lampada, la macchia appare da quella faccia più oscura, e dall' altra più chiara, del resto del foglio.

Se però portiamo le due sorgenti l' una da una parte, l' altra dall' altra del foglio e guardiamo di fronte una delle pagine del medesimo, la macchia ci invierà la luce della sorgente che sta innanzi per diffusione, e dell' altra per trasparenza. Allora, se la pagina è illuminata più intensamente dalla sorgente che sta innanzi, la macchia sembrerà più oscura del fondo bianco

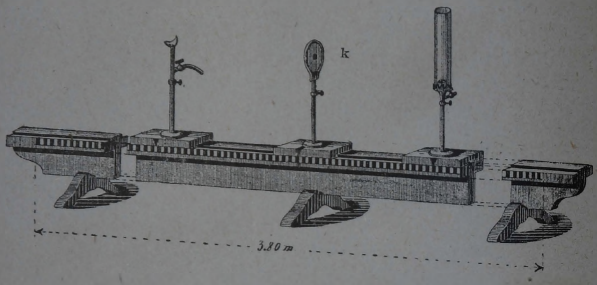


Fig. 87

non trasparente; se prevale invece l' illuminazione della sorgente che sta dietro il foglio, la macchia apparirà più chiara del fondo.

Essa non sarà più visibile e si confonderà col fondo, quando le illuminazioni prodotte sulle pagine del foglio dalle due sorgenti siano uguali. Basterà allora leggere sulle guide, su cui sono mobili le due sorgenti (fig. 87), le loro rispettive distanze dal foglio, e il rapporto dei quadrati di tali distanze ci darà, per quanto si è detto, il rapporto delle intensità delle sorgenti stesse.

149 — Sorgenti campione. — Per misurare le intensità, o poteri illuminanti, delle sorgenti di luce, occorre scegliere, come per la misura di ogni altra grandezza, una conveniente unità.

Per gli usi scientifici è stata proposta ed accolta, nel congresso degli elettricisti del 1884, l' *unità di luce Violle*, cioè *la luce emessa normalmente dalla superficie di un centimetro quadrato di platino alla temperatura di solidificazione.*

Nella pratica si adoperano altre unità più facilmente riproducibili: la candela inglese di *spermaceti*, la lampada Carcel ad olio di colza, la lampada Hefner ad acetato di amile, che è l' unità di luce adottata dalla Società elettrotecnica tedesca, ecc.

Però, nel congresso tenutosi a Ginevra nel 1896, si stabilì di adottare, per gli usi industriali, quale unità di luce, la *candela decimale*, che si definì come *un ventesimo della unità Violle*. Espresse in candele decimali, le altre unità valgono: Candela inglese 1,14 — Carcel 9,62 — Hefner 0,885.

150 — **Splendore.** — Ora, due sorgenti che presentino alla misura fotometrica la stessa intensità, possono differire perchè posseggano superficie diverse. Così, una reticella Auer può avere la stessa intensità luminosa di una lampada elettrica a incandescenza, pur essendo le due lampade di superficie fra loro molto diverse.

Quindi si è chiamato *splendore di una sorgente, l'intensità luminosa dell'unità della sua superficie.* Così, se 1 cm² di una reticella Auer ha l'intensità di 2 candele, diremo che lo splendore di quella reticella è di 2 candele.

Dalla definizione data risulta che, se si conosce l'intensità luminosa i di una sorgente di superficie q, il valore del suo splendore s è dato da $s = \frac{i}{q}$, purchè naturalmente l'intensità della sorgente sia la stessa su tutta la superficie.

151 — **Leggi del coseno.** — Ora, lo splendore di una sorgente è differente per la luce emessa nelle varie direzioni.

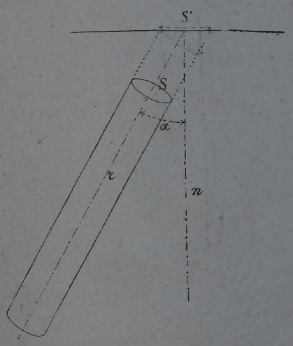


Fig. 88

Osservando, infatti, un piano uniformemente illuminato — ad esempio un foglio bianco — mediante un lungo tubo di cartone annerito dell'interno (fig. 88), troviamo che, comunque si inclini il tubo rispetto ad esso, l'occhio riceve sempre un'impressione luminosa *ugualmente intensa*. Ora, quando il tubo è pendicolare al foglio, riceviamo la luce da un'area uguale alla sezione retta S del tubo; e quando invece l'asse r di questo fa un angolo α colla normale n al foglio, la superficie che ci invia la luce è $S' = \frac{S}{\cos \alpha}$. Chiamando Q la quantità

eguale di luce inviata nei due casi, quella che invia l'unità di area è, nel primo caso, $\frac{Q}{S}$, e nel secondo $\frac{Q}{S'} = \frac{Q}{S} \cos \alpha$, cioè uguale alla quantità di luce da essa inviata nel primo caso, moltiplicata per il coseno dell'angolo formato dai raggi con la normale alla superficie, angolo che dicesi *di emissione*.

Dunque *lo splendore di una sorgente nelle varie direzioni è proporzionale al coseno dell'angolo di emissione.*

Secondo una legge perfettamente analoga a questa varia pure l'intensità di illuminazione di uno schermo, al variare dell'angolo formato con la sua normale dai raggi che lo colpiscono, angolo che dicesi *d'incidenza*.

Se, infatti, immaginiamo ora un fascio di raggi paralleli ad *r* (fig. 88) e diretti entro il tubo verso *S*, la quantità di luce è la stessa tanto sulla sezione retta *S*, come sulla sezione obliqua *S'*; e quindi, analogamente a quanto si è dimostrato sopra, la quantità di luce che arriva sull'unità di area della sezione obliqua è uguale a quella che arriva sull'unità di area della sezione retta, moltiplicata pel coseno dell'angolo d'incidenza. Ossia, *l'intensità di illuminazione di uno schermo è, a parità delle altre circostanze, proporzionale al coseno dell'angolo d'incidenza dei raggi.*

152 — Confronto di sorgenti di colore diverso. — Tutto quanto abbiamo detto sul confronto di due sorgenti si può bene applicare quando esse abbiano ugual tinta. Ma i vari lumi usati nella pratica emettono ciascuno luce di un colore speciale, come si riconosce dalla colorazione degli oggetti circostanti.

Per ciò, un esatto confronto delle intensità luminose riesce impossibile. Infatti, osserviamo sullo schermo bianco *CD* (fig. 89) le ombre dell'asticella *s*, date dai due lumi *L* ed *I* di tinta diversa. In corrispondenza dell'ombra *b* lo schermo è illuminato solo dal lume *L*, e in corrispondenza dell'ombra *a* solo dal lume *I*. Disponendo opportunamente i due lumi, si potranno portare le due ombre vicine; ma si vedrà che la loro differenza di colore impedisce di giudicare se le porzioni *a* e *b* dello schermo sono ugualmente illuminate.

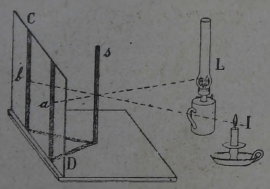


Fig. 89

Ne segue che il confronto delle intensità di due sorgenti presenta una difficoltà grandissima, allorchè la loro luce non ha la stessa tinta.

Riflessione.

153 — Abbiamo visto già (§ 137) che, quando un fascio di raggi luminosi incontra uua superficie levigata, il fascio cambia direzione tornando indietro, almeno parzialmente; si ha, cioè, il fenomeno della *riflessione*.

154 — **Leggi della riflessione.** — Il raggio luminoso *A B* (fig. 90), che arriva alla superficie separante i due mezzi (superficie *riflettente*), si chiama *raggio incidente*, e il raggio *B D*, che ritorna indietro dalla superficie stessa, si chiama *raggio riflesso*. E così gli angoli *i* ed *r*, che questi due raggi formano con la normale *BN* alla superficie riflettente, si chiamano rispettivamente *angolo di incidenza* e *angolo di riflessione*.

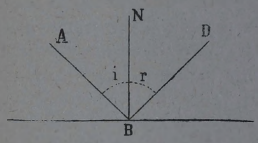


Fig. 90

Data la direzione dei raggi incidenti, quella dei raggi riflessi è determinata dalle seguenti leggi:

1.ª *Il raggio incidente, il corrispondente raggio riflesso, e la normale alla superficie riflettente nel punto di incidenza giacciono in un medesimo piano.*

2.ª *L'angolo di riflessione è uguale all' angolo di incidenza.*

Possiamo fornire la prova sperimentale di queste leggi con l'apparecchio della figura 91. Esso è costituito da un cerchio graduato, al centro del quale è posto uno specchietto piano, *s*, perpendicolare al cerchio stesso.

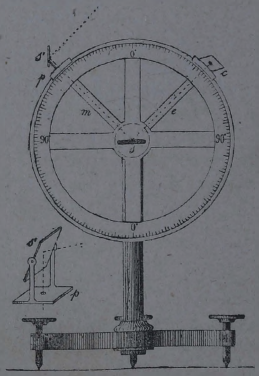


Fig. 91

Intorno al centro sono mobili due alidade *m* ed *e*, portanti rispettivamente, all' estremità scorrevole lungo la periferia del cerchio, le piastrine *p* e *c* traversate ciascuna da un piccolo foro.

Questi fori e il centro dello specchio determinano un piano parallelo a quello del cerchio graduato.

Facciamo cadere sullo specchietto mobile ausiliario s', portato dall'alidada m, un fascetto di raggi paralleli, e giriamo quello specchietto in modo che il fascio riflesso passi per il foro della piastrina p, e giunga al centro dello specchio s: allora, girando l'alidada e, troveremo una posizione per la quale il fascio riflesso passa pel foro della piastrina c. Pel modo con cui è costruito l'apparecchio, ciò indica che il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale allo specchio s nel punto di incidenza giacciono nel medesimo piano.

Di più si trova sempre che l'arco compreso fra le due alidade è diviso in parti uguali dalla normale alla superficie riflettente; ossia, che l'angolo d'incidenza è uguale all'angolo di riflessione.

La dimostrazione ora data delle leggi della riflessione non permette di stabilire se esse sieno rigorose o solo approssimate, non potendosi, nelle esperienze fatte in quel modo, determinare con molta esattezza le direzioni dei fascetti di luce. Vi ha un'altra dimostrazione diretta, che consente una precisione molto maggiore, ma non la riferiremo; chè tutto quanto vedremo, trattando degli specchi piani e sferici, è una prova dell'esattezza delle leggi suddette.

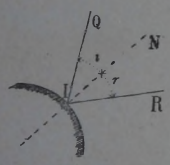


Fig. 92

155 — Costruzione del raggio riflesso. — Dato dunque un raggio QI (fig. 92) incidente su di una superficie riflettente, sarà facile determinare il raggio riflesso. Basterà condurre la normale NI alla superficie nel punto di incidenza e costruire, nel piano QIN, determinato dalla detta normale NI e dal raggio incidente, dall'altra parte di questo, un angolo NIR eguale all'angolo di incidenza QIN: IR sarà il raggio riflesso.

156 — Spiegazione della diffusione. — Quando una superficie non è perfettamente levigata, vuol dire che essa è ricoperta da un numero grandissimo di scabrosità, più o meno visibili, costituite da faccie aventi, in ogni piccola porzione della superficie stessa, direzioni differentissime. Quindi se la luce cade su di una superficie siffatta, anche in una sola direzione, si avranno raggi riflessi in ogni senso, che daranno luogo alla *diffusione* (§ 137).

Specchi piani.

157 — Chiamasi *specchio* una superficie levigata, la quale riflette la luce senza diffonderla. Se la superficie è piana, lo specchio dicesi *piano*.

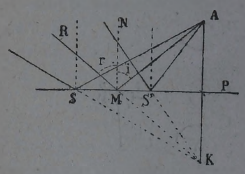


Fig. 93

Disponiamo davanti ad uno specchio piano $S\ P$ (fig. 93) un punto luminoso A; e consideriamo, tra i varii raggi partenti da esso, quelli che incontrano lo specchio e che giacciono nel piano del foglio. Sarà facile disegnare di ciascuno di essi il corrispondente raggio riflesso, seguendo la costruzione indicata nel § 155. I prolungamenti dietro lo specchio, di tutti questi raggi riflessi, s' incontrano in uno stesso punto K, simmetrico di A rispetto allo specchio.

Infatti, per uno qualunque di questi raggi, ad esempio AM, il piano individuato dal raggio e dalla normale MN allo specchio, è il piano del foglio. Dunque (per la prima legge) il raggio riflesso RM deve *trovarsi in questo piano*, ed il suo prolungamento MK incontrerà perciò in un punto K la perpendicolare AP, condotta da A allo specchio. Ora il triangolo AMK è isoscele, poichè l' angolo KAM è uguale ad i, e l' angolo AKM è uguale ad r che per costruzione è pure uguale ad i. La retta MP, essendo perpendicolare alla base di questo triangolo isoscele, la divide per metà: quindi $PA = PK$, cioè K è simmetrico di A rispetto alla superficie riflettente.

Tale dimostrazione si può ripetere per ogni altro raggio del piano della figura, e similmente pei raggi di ogni altro piano passante per AK; dunque si può concludere che, *in uno specchio piano, i raggi incidenti inviati da un punto danno luogo a raggi riflessi, formanti un cono avente per vertice un altro punto, simmetrico del primo rispetto al piano dello specchio.*

158 — **Immagini virtuali.** — Un osservatore potrà dunque ricevere i raggi riflessi, solo quando il suo occhio O sia nel cono che ha per vertice K e per base lo specchio (fig. 94) e avrà allora l' illusione che i raggi provengano dal punto K, poichè — come in seguito vedremo meglio, studiando l' occhio —

i raggi che provengono da un punto fanno vedere il punto dove si trova, e i raggi riflessi arrivano all' occhio, come se provenissero dal punto K.

Il punto luminoso che si vede in K, si chiama *immagine* del punto A, e si dice essere una immagine *virtuale*, perchè è punto di concorso dei prolungamenti ideali dei raggi riflessi e non dei reali raggi riflessi.

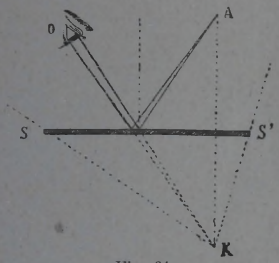


Fig. 94

Se davanti allo specchio si trova un oggetto qualsiasi, vale a dire un insieme di punti, ognuno di essi avrà la sua immagine virtuale; e l' insieme di queste formerà l' intera immagine virtuale dell' oggetto.

E siccome i punti simmetrici, rispetto a un piano, dei punti di una data figura formano una figura uguale ma non sovrapponibile, che dicesi *simmetrica* della prima rispetto al piano, possiamo dire che *l' immagine virtuale di un oggetto in uno specchio piano è simmetrica dell' oggetto, rispetto al piano dello specchio; ed è virtuale.*

159 — Spostamento dell' immagine per rotazione dello specchio. — Se lo specchio cambia posizione, si sposta anche l' immagine. Se lo specchio ruota intorno ad un asse situato nel suo piano e perpendicolare al piano del foglio, nel quale supponiamo sia situato il punto luminoso A (fig. 95) avremo le immagini A', A'' ecc., corrispondenti alle posizioni SS, $S'S'$, ecc. dello specchio. Queste immagini sono collocate tutte sopra la circonferenza di un cerchio, avente per centro il punto O in cui l' asse è tagliato dal piano del foglio, e per raggio OA. Infatti, essendo i triangoli MOA, MOA' uguali, ed uguali pure i triangoli $M'OA$, $M'OA''$, risulta $OA = OA' = OA''$.....

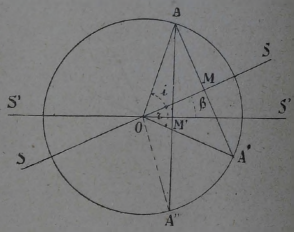


Fig. 95

Chiamando i l' angolo AOS, si ha: $AOA' = 2i$;
e indicando con β l'angolo SOS' di cui ha ruotato lo specchio,

$$AOS' = i + \beta, \qquad AOA'' = 2(i + \beta) = 2i + 2\beta;$$

quindi $A'OA'' = AOA'' - AOA' = 2i + 2\beta - 2i = 2\beta.$

Ma $A'OA''$ è l'angolo di cui ha girato l'immagine del punto A, dunque: *l'angolo di cui ruota l'immagine di un punto fisso è doppio di quello di cui gira lo specchio.*

Un'importante applicazione di questo principio è quella di rendere apprezzabili e misurabili dei piccoli spostamenti.

Specchi sferici.

160 — Si chiamano *specchi sferici* quelli la cui superficie riflettente è parte di una sfera. Si distinguono in *concavi* e *convessi*, a seconda che la superficie speculare è rivolta verso il centro C (fig. 96), oppure verso la parte opposta M (fig. 97).

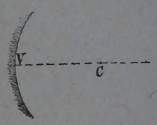


Fig. 96

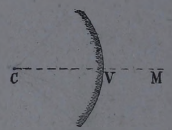


Fig. 97

Per il nostro studio rappresenteremo gli specchi sferici mediante la loro sezione con un piano (il piano del foglio) passante per il centro C della sfera di cui fa parte lo specchio e per il punto di mezzo, o vertice, della calotta da cui è costituito, sezione che è un arco di cerchio massimo, cioè avente per raggio il raggio della sfera. Il vertice della calotta è il punto di mezzo V di quest'arco, e si chiama *vertice* dello specchio; la retta CV, *asse principale* dello specchio; ogni altra retta passante per il centro dello sfera, *asse secondario* dello specchio stesso.

161 — **Proprietà degli specchi concavi.** — Noi ci limiteremo al caso in cui la superficie riflettente BB (fig. 98) sia una piccola parte dell'intera superficie sferica, cioè abbia piccola *apertura*, intendendosi per apertura dello specchio l'angolo α, compreso tra le rette che vanno dal centro C dell'arco sezione agli estremi di questo.

Sia davanti ad uno specchio concavo BB (fig. 99) un punto luminoso A sull'asse principale, e costruiamo il raggio riflesso spettante al raggio incidente AB.

Poichè la normale in un punto B della sfera non è altro che il raggio BC della sfera stessa, il detto raggio riflesso sarà (§ 155) la retta BA' formante con BC un angolo uguale ad ABC.

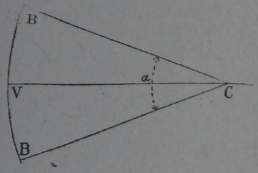


Fig. 98

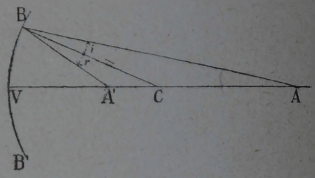


Fig. 99

Siccome BC è la bisettrice dell'angolo ABA', essa, nel triangolo $AA'B$, dividerà il lato opposto in due parti, AC e $A'C$, proporzionali ai due lati AB e $A'B$, onde

$$\frac{AB}{A'B} = \frac{AC}{A'C}.$$

Poichè lo specchio è di piccola apertura, AB è prossimamente uguale ad AV, e $A'B$ ad $A'V$; per cui si potrà scrivere

$$\frac{AV}{A'V} = \frac{AC}{A'C}. \qquad (1)$$

Ora,

$$AC = AV - CV, \qquad A'C = CV - A'V;$$

e indicando con R il raggio CV della sfera, e con p e q i segmenti AV e $A'V$,

$$AC = p - R, \qquad A'C = R - q.$$

Quindi, sostituendo nella proporzione (1), si otterrà

$$\frac{p - R}{R - q} = \frac{p}{q},$$

da cui, liberando dai denominatori e dividendo ambo i membri per pqR:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}. \qquad (2)$$

Ossia, la distanza q di A' da V dipende soltanto dal valore di p e di R, e non dall'inclinazione del raggio sullo specchio.

Perciò ogni raggio partente da A, che cada sullo specchio BB di piccola apertura, darà per riflessione un raggio che incontra l' asse principale nel punto A': ossia A' sarà l' *immagine* di A o anche, come si dice, il *fuoco* di A. Se A' fosse il punto luminoso, A sarebbe la sua immagine, o il suo fuoco: i punti A, A' sono dunque immagine, o fuoco, uno dell' altro e perciò si chiamano *fuochi coniugati*.

Se il punto luminoso non è sull' asse principale, ma in E (fig. 100), non molto lontano dall' asse, conducendo l' asse secondario EC, si possono ripetere per questo punto di quest' asse tutte le considerazioni fatte per il punto A dell' asse principale. Si troverà quindi che i raggi partiti da E dànno luogo a raggi riflessi passanti tutti per un punto E', posto su EC.

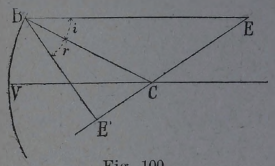


Fig. 100

Quando avremo perciò davanti allo specchio un oggetto, di ogni suo punto si formerà un' immagine: l' insieme di queste costituirà l' *immagine dell' oggetto*.

162 — **Fuoco.** — Quando si conosca la distanza p di un punto luminoso situato sull' asse principale, o su di un asse secondario, si può calcolare la distanza q dell' immagine dal vertice dello specchio, o dal punto in cui l' asse secondario incontra lo specchio, mediante la formula

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}.$$

Se p ha un valore molto grande, $\frac{1}{p}$ sarà quasi nulla; perciò la formula si ridurrà allora praticamente a

$$\frac{1}{q} = \frac{2}{R},$$

donde

$$q = \frac{R}{2}.$$

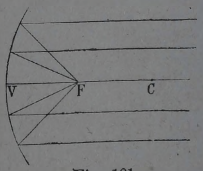


Fig. 101

Perciò, quando arrivino sullo specchio raggi paralleli all' asse principale, i raggi riflessi andranno a passare per un punto F del medesimo (fig. 101), collocato a metà del raggio CV. Un tal

punto dicesi *fuoco principale*, o anche, semplicemente, *fuoco* dello specchio concavo, e la sua distanza FV dal vertice dello specchio *distanza focale*. Se cadono sullo specchio raggi paralleli ad un asse secondario, i raggi riflessi si riuniscono nel punto di mezzo del raggio geometrico dello specchio, parallelo ai medesimi, punto che dicesi *fuoco* per quell'asse secondario.

Possiamo trovare sperimentalmente la posizione del fuoco esponendo uno specchio concavo ai raggi del sole, i quali si possono ritenere come paralleli. Mediante un piccolo schermo si trova la posizione in cui i raggi riflessi formano il circolo luminoso minimo e si riconoscerà che si trova a metà del raggio dello specchio parallelo ai raggi solari.

163 — Immagine reale di un punto. — Se il punto luminoso non è molto lontano dallo specchio, $\frac{1}{p}$ non è più trascurabile; e se il punto va avvicinandosi allo specchio, $\frac{1}{p}$ aumenta, e quindi per la (2) $\frac{1}{q}$ diminuisce, ossia q cresce. Dunque, quando il punto luminoso si avvicina allo specchio, l'immagine se ne allontana. Quando il punto luminoso sia giunto nel centro C, si ha

$$p = R, \qquad \text{e quindi} \qquad q = R,$$

cioè l'immagine coincide col punto stesso.

Continuando il punto luminoso ad avvicinarsi allo specchio, l'immagine, che fino allora era più vicina allo specchio del punto stesso, passa al di là di questo: infatti

$$\text{se } p > R, \quad q < R; \qquad \text{e se } p < R, \quad q > R.$$

Quando il punto luminoso sia giunto nel fuoco,

$$p = \frac{R}{2}, \qquad \text{e quindi} \qquad \frac{1}{q} = \frac{2}{R} - \frac{2}{R} = 0;$$

e perciò $q = \infty$, ossia i raggi riflessi sono paralleli fra loro.

In tutti questi casi i raggi riflessi si incontrano effettivamente e perciò l'immagine si dice *reale* ed è davanti allo specchio.

164 — Immagine virtuale di un punto. — Se infine la distanza del punto dallo specchio diviene minore della distanza focale, p sarà minore di $\frac{R}{2}$, e q risulterà perciò negativo.

Ciò indica che i raggi riflessi sono divergenti e che i loro prolungamenti si incontrano dietro allo specchio, ad una distanza q da questo. In tal caso l' immagine, formata, come negli specchi piani, dal concorso dei prolungamenti ideali dei raggi riflessi, si dice *virtuale*.

165 — Costruzione dell' immagine di un punto. — È facile costruire graficamente l' immagine di un punto A (fig. 102) situato fuori dell' asse principale.

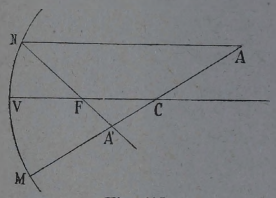


Fig. 102

Si conduca, infatti, da A un raggio AM passante per il centro C. Poichè questo raggio è normale allo specchio, si rifletterà tornando su sè stesso. Un secondo raggio $A\ N$, condotto da A parallelamente all'asse principale dello specchio, darà un raggio riflesso passante pel fuoco F. Il punto A' d' incontro dei raggi riflessi MA ed NF, sarà l' immagine del punto luminoso A.

166 — Immagine di un oggetto. — Le immagini di oggetti di forma piana, date dagli specchi sferici, risultano praticamente *simili* agli oggetti stessi, qualora gli specchi siano di piccola apertura, e i raggi incidenti siano poco inclinati sull'asse principale. Perciò è facile costruire tali immagini geometricamente, cercando soltanto quelle di alcuni punti di rifemento.

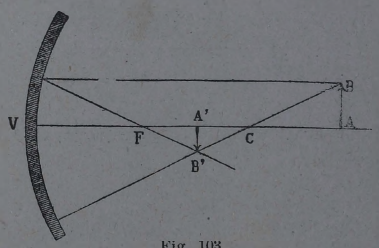


Fig. 103

Così, ad esempio, si otterrà l' immagine di un segmento di retta AB (fig. 104), costruendo soltanto le immagini A' e B' dei suoi estremi. Il segmento $A'\ B'$ sarà l' immagine totale.

E se il segmento $A\ B$ poggia perpendicolarmente sull' asse principale dello specchio (fig. 103), basterà costruire la sola immagine B' dell' estremo B che non è sull' asse, e da B' condurre la perpendicolare $A'\ B'$ all' asse medesimo.

167 — Rapporto tra l' immagine e l' oggetto. — Per la similitudine dei triangoli ABC, $A'B'C$ (fig. 103) si ha:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{A'C}{AC},$$

e quindi per la (1) del § 161

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{A'V}{AV} = \frac{q}{p}. \qquad (3)$$

Ciò mostra che *le dimensioni omologhe*, cioè le così dette *grandezze lineari, dell' immagine e dell' oggetto stanno tra loro come le relative distanze dal vertice dello specchio.*

Quando l' oggetto è lontanissimo, il rapporto $\frac{q}{p}$ è piccolissimo, e quindi l' immagine, che è pochissimo più lontana dallo specchio del fuoco principale, è piccolissima. Avvicinandosi l' oggetto allo specchio, l' immagine si avvicina al centro (fig. 104) e si ingrandisce, perchè diminuendo p, q cresce e quindi il rapporto $\frac{q}{p}$ aumenta.

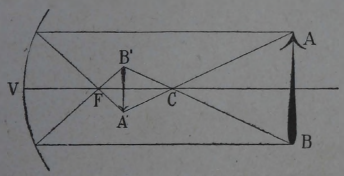


Fig. 104

Quando l'oggetto arriva al centro, l' immagine vi arriva pure ed è grande quanto l' oggetto, perchè allora $q = p$.

Quando l' oggetto passa tra il centro e il fuoco, l' immagine passa al di là del centro e diventa più grande dell' oggetto (fig. 105), e tanto più grande, quanto più questo si avvicina al fuoco, perchè allora q è maggiore di p e cresce sempre al diminuire di p. Allorchè l' oggetto è vicinissimo al fuoco, ma sempre a una distanza maggiore di questo dallo specchio, l' immagine è lontanissima e grandissima.

Finchè l' oggetto è più lontano dallo specchio del fuoco, l' immagine è sempre *reale* e *rovesciata*, come mostrano le figure 104 e 105.

Per vedere queste immagini, che sono davanti allo specchio, come l' oggetto, bisogna che l'occhio si trovi in posizioni opportune, e cioè dentro agli angoli opposti al vertice degli angoli formati dalle rette che vanno da ogni punto dell' oggetto ai limiti dello specchio, angoli entro a cui si trovano i raggi riflessi.

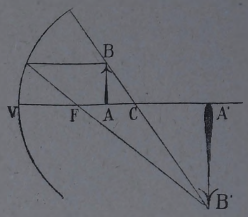


Fig. 105

Quando l' oggetto, coll' avvicinarsi allo specchio, oltrepassa il fuoco, i raggi riflessi, corrispondenti ai raggi incidenti che provengono da ogni punto dell' oggetto, sono divergenti, si incontrano i loro prolungamenti ideali dietro lo specchio, cioè la immagine è virtuale e diritta, come mostra la figura 106. Questa immagine è lontanissima e grandissima quando l' oggetto è ancora vicinissimo al fuoco; e va avvicinandosi allo specchio e impicciolendosi a mano a mano che l' oggetto si avvicina allo specchio stesso, rimanendo però sempre più lontana dallo specchio dell' oggetto e più grande di questo.

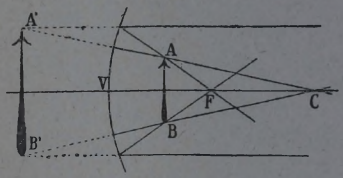


Fig. 106

168 — Verifica sperimentale. — Questi risultati, nel caso delle immagini reali, si mostrano facilmente portando davanti ad uno specchio concavo S una candela A e raccogliendone l' immagine A' su di uno schermo come mostra la figura 107.

La candela e lo schermo si possono far scorrere lungo un regolo diviso, che permette

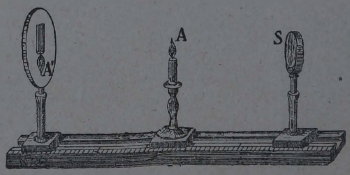


Fig. 107

di valutare le loro distanze dal centro dello specchio. Queste distanze verificano sempre la formula (2).

169 — **Specchi convessi.** — Quando la superficie speculare è convessa, se l' apertura dello specchio non è troppo grande, i raggi incidenti, che partono da uno stesso punto A (fig. 108), dànno luogo a raggi riflessi, i quali prolungati passano per un secondo punto A', che è l' immagine virtuale del primo.

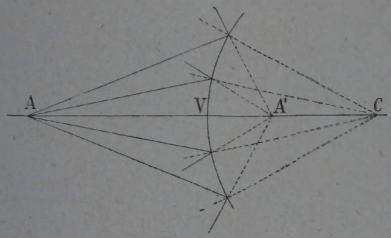


Fig. 108

Così, ad un fascio di raggi incidenti paralleli all' asse principale dello specchio (fig. 109), corrisponde un fascio di raggi riflessi, i cui prolungamenti si vanno a incontrare in un punto F, situato a metà del raggio dello specchio e designato anche in questo caso col nome di *fuoco*.

Uno specchio convesso non può dare che immagini virtuali, giacchè i raggi che cadono divergenti sullo specchio dànno luogo a raggi riflessi più divergenti di quelli incidenti. Le costruzioni geometriche — che si fanno in modo analogo a quello degli specchi concavi — provano che queste immagini virtuali sono sempre diritte, più piccole dell' oggetto, più vicine di questo allo specchio, sempre comprese fra lo specchio e il fuoco, e tanto più piccole, quanto più lontano è l' oggetto.

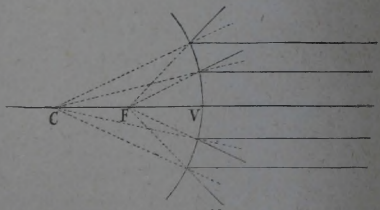


Fig. 109

Rifrazione.

170 — Se un raggio luminoso SO (fig. 110) passa da una sostanza trasparente (*mezzo ottico*) ad un' altra, cambia direzione nel punto O in cui incontra la superficie di separazione

dei due mezzi, cioè segue nel secondo mezzo una retta OR che non è per diritto con SO.

La deviazione di un raggio nel passaggio da un mezzo ad un altro dicesi *rifrazione*. L' angolo i, che il *raggio incidente* SO fa colla normale ON alla superficie di separazione, dicesi *angolo di incidenza*, e l' angolo r, che il *raggio rifratto* OR forma colla normale stessa, si chiama *angolo di rifrazione*.

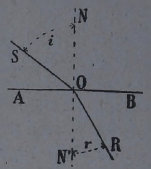


Fig. 110

171 — Leggi della rifrazione. — Per indagare le leggi della rifrazione, possiamo servirci dell'apparecchio mostrato dalla fig. 111. Una vaschetta cilindrica $ANBN'$, piena a metà di acqua, è fissata su di un cerchio graduato verticale KK', per modo che il suo asse passi per il centro di quel cerchio e sia perpendicolare al suo piano. Due piastrine metalliche I ed R, portate da due alidade, hanno ciascuna un foro, attraverso il quale può essere inviato un raggio di luce. Entrambi i fori si trovano in uno stesso piano verticale parallelo a quello del cerchio graduato e passante per il punto di mezzo C della vaschetta, qualunque sia la posizione delle alidade.

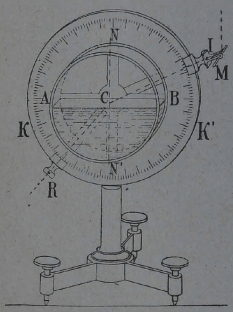


Fig. 111

Per fare un' esperienza si fissa in una posizione qualsiasi l' alidada che porta la piastrina I, e, mediante un piccolo specchio M, si dirige un fascetto di luce attraverso il foro della lastrina medesima, per modo che la direzione del fascio passi pel punto di mezzo C dell' asse della vasca. Si riesce allora per tentativi a disporre l' altra alidada in modo che il raggio rifratto passi per il foro della piastrina R. Ciò vuol dire che:

Il raggio rifratto giace sempre nel piano individuato dalla normale e dal raggio incidente.

Dirigendo ora la prima alidada verticalmente, cioè perpendicolarmente alla superficie dell' acqua, si vede che l'altra deve esser disposta anch' essa verticalmente perchè il raggio rifratto passi pel foro della piastrina R. Ciò prova che, quando il

raggio incidente è perpendicolare alla superficie di separazione dei due mezzi, il raggio rifratto ha la stessa direzione di quello incidente, cioè vi ha passaggio della luce dall' uno all' altro mezzo senza cambiamento di direzione del raggio, ossia senza rifrazione. All' uscita dalla vaschetta non vi sarà quindi rifrazione, qualunque sia la direzione della prima alidada, perchè il raggio rifratto, venendo dal centro, incontra la superficie della vasca perpendicolarmente; perciò la direzione della seconda alidada indica, in ogni caso, la direzione che ha il raggio rifratto dentro l' acqua. Ripetendo poi l' esperienza con angoli d' incidenza differenti, misurando sul cerchio gli angoli formati dal raggio incidente e dal raggio rifratto e leggendo sulle tavole trigonometriche i seni corrispondenti, se i due mezzi rimangono invariati si trova che:

Il rapporto dei seni dell' angolo di incidenza e dell' angolo di rifrazione, si mantiene costante al variare dell' angolo d' incidenza.

Al valore di questo rapporto costante si è dato il nome di *indice di rifrazione relativo ai due mezzi*. Di solito si indica colla lettera n; e si rappresenta quindi la 2ª legge della rifrazione colla formula:

$$\frac{sen\ i}{sen\ r} = n. \qquad (4)$$

172 — Luce bianca e luce monocromatica. — L' esperienza ora descritta si fa ordinariamente adoprando per raggio incidente un fascetto di raggi solari, cioè di luce bianca.

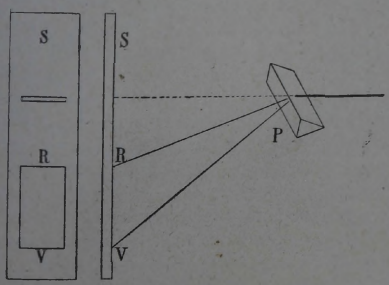


Fig. 112

Ma allora, osservando bene il raggio rifratto, si vede che il fenomeno non è così semplice come risulta dalla legge enunciata. Facciamo difatti cadere un fascio di raggi solari entrante in una camera buia per una stretta fessura sopra una delle faccie laterali di un *prisma* di vetro P (fig. 112), disposto in modo che i suoi spigoli sieno paralleli alla fessura,

e raccogliamo il fascio dei raggi rifratti sopra uno schermo S. Vedremo che sullo schermo non si disegna già una riga bianca, ma una fascia allungata RV, che presenta tutti i colori dell' iride. Ciò dimostra che il fascio di raggi bianchi, nel rifrangersi, si è sparpagliato in un ventaglio di luce di diversi colori. Tal fenomeno si chiama *dispersione* della luce e la fascia luminosa $R\ V$ dicesi *spettro*.

Tra i colori così ottenuti, sette principali se ne distinguono, nell' ordine seguente:

rosso, aranciato, giallo, verde, azzurro, indaco, violetto.

I raggi meno deviati sono i rossi, i più deviati sono i violetti.

Ora pratichiamo nello schermo S un foro, in corrispondenza di un colore, per esempio del verde, e facciamo cadere il fascetto di raggi che ne esce, sopra un secondo prisma P' posto al di là del detto schermo come mostra la figura 113. Osserveremo su di un secondo schermo S', posto al di là dello schermo S, che il raggio rifratto non si allarga più sensibilmente a ventaglio, e che la luce emergente dal secondo prisma è ancora verde come l' incidente. Ora se, girando un poco il prisma P, facciamo cadere sul prisma P', sotto lo stesso angolo di incidenza, prima i raggi rossi, poi i turchini, troveremo che questi sono deviati dal secondo prisma più di quelli.

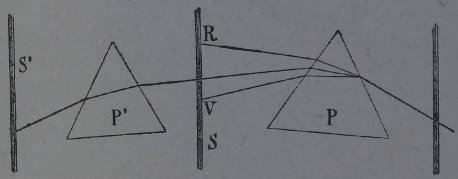


Fig. 113

Tali esperimenti ci dicono che un raggio di luce bianca risulta dalla sovrapposizione di raggi di colore differente, i quali restano diversamente deviati per il passaggio da un mezzo ad un altro. E ciò equivale a dire che l' indice di rifrazione relativo a due mezzi varia a seconda della specie dei raggi che si considerano.

Quando dunque si dà il valore dell' indice di rifrazione bisogna indicare la specie di raggi a cui si riferisce.

Una luce, i cui raggi non si sparpagliano nella rifrazione, cioè, in cui la rifrazione non è accompagnata dal fenomeno

della dispersione, o, come si dice anche, della decomposizione, si dice *semplice* o *monocromatica*.

Si ottiene, ad esempio, luce sensibilmente monocromatica gialla mettendo un po' di sal comune in una fiamma ad alcool, o nella fiamma non luminosa di un becco Bunsen.

Indice assoluto di rifrazione.

173 — Consideriamo adunque un raggio di luce monocromatica, e studiamo il caso in cui lo spazio A (fig. 114) che esso attraversa, anzichè un mezzo ponderabile, sia il vuoto, come accade per la luce del sole che arriva alla nostra atmosfera, o anche per un raggio di luce che colpisca un pezzo di vetro sotto una campana in cui sia stato fatto il vuoto. Ora il rapporto

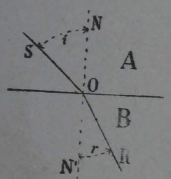


Fig. 114

$$n' = \frac{sen\ i}{sen\ r},$$

per un raggio di una data luce monocromatica, che passi dal vuoto in un mezzo B, dicesi *indice assoluto* di rifrazione del mezzo B per quella luce.

174 — **Mezzi più rifrangenti e meno rifrangenti.** — L'esperienza insegna che, quando un raggio SI (fig. 115) penetra dal vuoto in un mezzo *qualunque* XX, si accosta alla normale IN, cioè che i è maggiore di r, e perciò $sen\ i > sen\ r$, poichè trattasi sempre di angoli minori di 90°. Ne deriva che *l'indice assoluto di rifrazione di un mezzo qualunque è sempre maggiore dell'unità.*

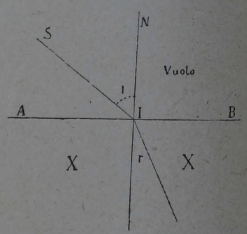


Fig. 115

L'indice di rifrazione assoluto varia da sostanza a sostanza, e di due sostanze si dice *più rifrangente* quella che ha l'indice assoluto di rifrazione maggiore, perchè il raggio entrando in essa dal vuoto devia maggiormente dalla direzione che aveva.

Tutti i corpi solidi e liquidi sono più densi dell'aria e più rifrangenti di essa; il vetro è più denso dell'acqua e più

rifrangente, il diamante più denso e più rifrangente che non il vetro: ma non è sempre vero che di due mezzi sia più rifrangente il più denso: infatti l'alcool, l'etere, la benzina, l'olio d'oliva sono più rifrangenti e pur meno densi dell'acqua.

175 — **Relazione fra gl'indici assoluti di rifrazione di due mezzi e l'indice relativo.** — La conoscenza dell'indice assoluto di rifrazione di un dato mezzo è della massima importanza.

Si dimostra infatti che, se l'indice assoluto di rifrazione del primo mezzo è n' e quello del secondo è n'', l'indice n di rifrazione relativo al passaggio dal primo al secondo mezzo cioè il rapporto dei seni degli angoli di incidenza e di rifrazione in tale passaggio, è dato da

$$n = \frac{n''}{n'}. \qquad (5)$$

Perciò, se si conosce l'indice assoluto di rifrazione di una sostanza e il suo indice relativo alle altre sostanze, siamo in grado di calcolare gli indici di rifrazione relativi a tutte le combinazioni possibili di queste sostanze à due a due.

Ordinariamente si determinano coll'esperienza gli indici relativi al passaggio dall'aria nelle diverse sostanze, e da essi e dall'indice assoluto dell'aria, il quale si determina pure direttamente coll'esperienza, si calcolano, mediante la (5), gli indici assoluti delle diverse sostanze. Da questi poi, quando occorra, mediante la detta relazione, si calcola l'indice relativo ad una coppia qualunque di sostanze. L'indice assoluto dell'aria, nelle condizioni normali di pressione e temperatura, è 1,0003, e quindi gl'indici assoluti delle diverse sostanze (solide o liquide), i quali si ottengono moltiplicando gli indici di esse rispetto all'aria per l'indice assoluto di questa, sono pochissimo più grandi degli indici delle medesime rispetto all'aria. Quando si tratta di valori approssimativi, è inutile quindi di fare la distinzione fra indice assoluto di un solido o liquido e il suo indice rispetto all'aria, e si dice senz'altro *indice di rifrazione* del corpo. In questo senso si dice che l'indice di rifrazione dell'acqua è circa $\frac{4}{3}$, quello del vetro comune un po' più di $\frac{3}{2}$, quello del diamante, che è uno dei più grandi, $\frac{10}{4}$, ecc.

Dalla relazione (5) risulta che, quando il passaggio della luce avviene inversamente, l'indice relativo ai due mezzi assume il valore inverso; e ciò indica che il cammino della luce nella rifrazione è lo stesso qualunque sia dei due raggi quello incidente. E risulta pure che, quando la luce passa dal mezzo meno rifrangente al più rifrangente, l'indice relativo ai due mezzi è maggiore dell'unità e quindi si ha avvicinamento del raggio alla normale; e che, quando la luce passa dal mezzo più rifrangente al meno rifrangente, l'indice relativo ai due mezzi è minore dell'unità e il raggio perciò si allontana dalla normale. Nel primo caso l'indice relativo ai due mezzi si dice *diretto*, nel secondo, *inverso*.

L'aria, come abbiam detto, è meno rifrangente di tutti i corpi solidi e liquidi, onde, quando la luce passa dall'aria in questi corpi, si avvicina alla normale: nel passaggio inverso si allontana dalla normale.

Angolo limite.

176 — Per quanto abbiam visto, un raggio di luce può sempre passare rifrangendosi da un mezzo meno rifrangente in uno più rifrangente. Non succede però così nel caso opposto.

Infatti, se in questo secondo caso, a partire da un piccolo valore di i, andiamo aumentando via via l'angolo di incidenza, si manterrà sempre $r > i$. Arriveremo quindi col raggio rifratto OR a rasentare la superficie rifrangente, cioè ad avere un angolo NOR di rifrazione uguale a 90° (fig. 116). Il valore l che ha allora l'angolo di incidenza i si chiama *angolo limite:* esso si otterrà dalla formula $n = \frac{sen\ i}{sen\ r}$ (nella quale n dovrà rappresentare l'indice di rifrazione relativo al passaggio dal mezzo più rifrangente al meno rifrangente, cioè l'indice inverso relativo ai due mezzi), ponendo $i = l$, e $r = 90°$. Siccome $sen\ 90° = 1$, si avrà

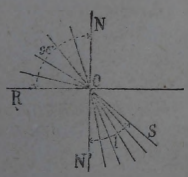


Fig. 116

$$sen\ l = n. \qquad (6)$$

Dunque *il seno dell'angolo limite è uguale all'indice di rifrazione relativo al passaggio dal mezzo più*

rifrangente a quello meno rifrangente, cioè uguale all' indice inverso relativo ai due mezzi.

Per cui sarà facile calcolare l'angolo limite relativo a due determinati mezzi. Per es., essendo l'indice di rifrazione relativo al passaggio dall'aria al vetro circa $\frac{3}{2}$, e quindi l'indice relativo al passaggio inverso circa $\frac{2}{3} = 0{,}666$, l' angolo limite relativo al vetro e all'aria è quello il cui seno è circa 0,666, cioè a un dipresso 42°.

177 — **Riflessione totale.** — Se quindi un raggio incontra la superficie di separazione di due mezzi — provenendo da quello meno rifrangente — ed ha un angolo di incidenza maggiore dell'angolo limite, il raggio rifratto corrispondente non può esistere; e l'esperienza, infatti, dimostra che tutta la luce incidente viene riflessa nel primo mezzo, secondo le leggi solite della riflessione. A questo fenomeno si dà il nome di *riflessione totale*.

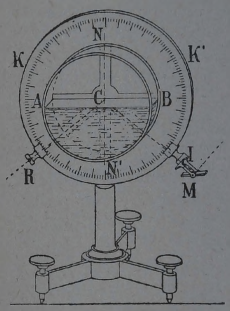


Fig. 117

Noi possiamo metterlo in evidenza servendoci dell'apparecchio che abbiamo usato per dimostrare le leggi della rifrazione.

Disponiamo l' alidada che porta lo specchio *M* (fig. 117) al disotto della superficie libera *AB* del liquido contenuto nella vaschetta cilindrica; e, mediante quello specchio, inviamo un raggio *IC* che, attraversando il liquido, incontri la detta superficie sotto un angolo di incidenza *ICN'* maggiore dell'angolo limite. Vedremo che non vi ha raggio emergente nell'aria, ma che, disponendo l'altra alidada nella posizione indicata dalla figura, il raggio esce dal foro della piastrina *R*.

Un altro apparecchio, col quale si può mettere in evidenza in modo molto appariscente il fenomeno della riflessione totale, è quello rappresentato dalla figura 118. In un vaso di vetro *VV*, pieno di acqua, si immerge, verticalmente, una lastra metallica *SS*, a cui è saldato perpendicolarmente un tubo pure metallico *M*, che ha nella parte superiore dei fori disposti come indica la figura. Nell'interno del tubo è collocato un cono *C*, argentato

sulla superficie esterna e avente l' angolo al vertice di 90°. Questo cono è disposto in modo che i fori suddetti si trovano nel piano di una delle sue sezioni normali.

Se un raggio di luce cade sulla superficie esterna del cono, parallelamente all' asse comune di esso e del tubo, poichè le generatrici del cono formano coll' asse un angolo di 45°, il raggio viene riflesso perpendicolarmente a detto asse. Quindi, facendo cadere sul cono un fascio intenso di luce nella direzione dell' asse, i raggi riflessi saranno tutti perpendicolari all' asse del cono: alcuni di essi usciranno quindi dai fori del tubo e colpiranno la superficie dell' acqua. Questi raggi formeranno angoli di incidenza via via crescenti, dal centro all' orlo della vasca: quelli di essi per i quali l' angolo d' incidenza è minore dell' angolo limite usciranno nell' aria, gli altri non potranno uscire e si rifletteranno totalmente sulla superficie dell' acqua. Ciò si vede benissimo guardando contro alla lastra.

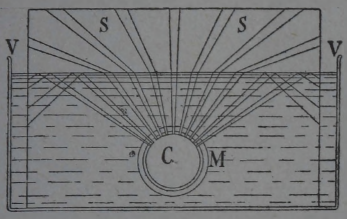


Fig. 118

178 — Prismi a riflessione totale. — Un' applicazione molto diffusa della riflessione totale si ha in alcuni *prismi*, detti appunto *a riflessione totale*. Sono prismi di vetro, che hanno di solito per sezione normale un triangolo rettangolo isoscele. Un raggio SI (fig. 119), che cada normalmente su di una faccia AB, non essendo deviato, incontra la faccia opposta AC con un angolo di incidenza di 45°, cioè maggiore dell' angolo limite del vetro. Perciò viene riflesso totalmente secondo IR, ed esce per l' altra faccia BC senza esser deviato, perchè la incontra normalmente.

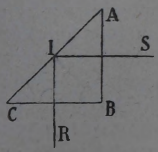


Fig. 119

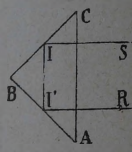


Fig. 120

Lo stesso prisma può servire, come mostra la figura 120, per una duplice riflessione. Vedremo in seguito varie applicazioni di questi prismi negli strumenti d' ottica.

Rifrazione atmosferica.

179 — Lo studio che abbiamo fatto finora ci permette intanto di interpretare agevolmente alcuni fenomeni ottici, che si osservano nella nostra atmosfera.

In generale, se più strati di una sostanza trasparente di varia densità sono sovrapposti l'uno all'altro, ad ogni passaggio da uno strato al seguente la luce subisce una deviazione. Ora, l'atmosfera può considerarsi come costituita di tanti strati sovrapposti, la cui densità diminuisce col crescere dell'altitudine; e perciò un raggio luminoso, passando obliquamente da ognuno di essi al successivo, deve cambiare direzione. Tale cambiamento di direzione, che avviene gradatamente e diviene sensibile solo per tragitti molto lunghi, costituisce la *rifrazione atmosferica*.

La figura 121, nella quale T rappresenta una porzione del globo terrestre, ed S la posizione reale di un astro, ci mostra — alquanto esagerato — il fenomeno della rifrazione atmosferica per gli astri, cioè della *rifrazione astronomica*, in virtù della quale l'astro S è veduto in S', più alto sull'orizzonte di quanto effettivamente non sia. L'aumento dell'altezza dell'astro sull'orizzonte, prodotto dalla rifrazione atmosferica è massimo, di circa mezzo grado, quando l'astro è all'orizzonte; diventa molto più piccolo col crescere di quell'altezza, ed è nullo allorchè l'astro è allo zenit. Siccome il diametro apparente del sole è di circa mezzo grado, così il sole, all'orizzonte, è innalzato del detto suo diametro; e poichè la rotazione diurna apparente degli astri è di 1° in 4 minuti di tempo, il sole appare al mattino circa due minuti prima, e scompare la sera circa due minuti dopo, che se mancasse l'atmosfera terrestre. Ciò però nel caso in cui, per il moto diurno, il sole, in vicinanza dell'orizzonte, si sposti quasi perpendicolarmente a questo.

Fig. 121

Un'altra forma di rifrazione, dovuta all'atmosfera, è la cosiddetta *rifrazione terrestre*, che si ha sul mare quando vediamo una riva o un bastimento sollevati apparentemente dalle acque sul lontano orizzonte (fig. 122).

La spiegazione di questo fenomeno è data dalla figura 123: *S* raffigura il bastimento, *O* l'osservatore alquanto elevato sul livello del mare. Se l'aria tra *S* ed *O* fosse dappertutto ugualmente densa, si vedrebbe il bastimento dov'è in realtà. Ma siccome la densità dell'aria sul mare decresce rapidamente col crescere dell'altitudine, il raggio *Sa* giunge ad *O* per la via ricurva *abcdef*, poichè, nel procedere, esso si va gradatamente sempre di più allontanando dalla verticale. L'osservatore *O* vede dunque il bastimento in *S'*, nella direzione dell'ultimo tratto della curva.

Fig. 122

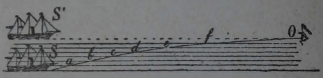


Fig. 123

In modo simile posson rendersi anche visibili oggetti terrestri che stiano sotto l'orizzonte.

Miraggio. — La rifrazione attraverso i successivi strati dell'atmosfera dà luogo a un altro fenomeno interessante, chiamato *miraggio*.

Nelle vaste ed infuocate pianure africane, gli strati d'aria più bassi si riscaldano e si dilatano assai più che quelli soprastanti. Perciò i raggi che, partendo da un oggetto, si dirigono verso il basso, trovano strati d'aria via via meno densi e quindi si allontanano gradatamente dalla normale, finchè si riflettono totalmente e risalgono verso l'alto. Un occhio, che sia in posizione di riceverli, ha l'impressione che provengano dal basso (fig. 124), come rimandati da un'ampia superficie riflettente. Il fenomeno del miraggio ha prodotto talora insidiose illusioni, facendo credere all'esistenza di prossimi bacini d'acqua.

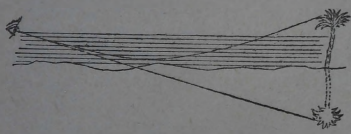


Fig. 124

Arcobaleno.

180 — I fenomeni delle riflessione, della rifrazione e della dispersione, spiegano completamente la meteora ottica a tutti nota col nome di *arcobaleno*. Essa si presenta ai nostri occhi,

rivolti ad una nube che si risolva in pioggia, quando si abbia il sole alle spalle, alto non più di 40° sull'orizzonte. Si vedono disegnarsi nel cielo due archi concentrici, che presentano i colori dello spettro, ed hanno per asse il raggio solare che passa per l'occhio dell'osservatore. L'arco di raggio minore ha internamente il violetto ed esternamente il rosso: l'altro ha i colori disposti in ordine inverso, è assai più pallido, e perciò meno frequentemente visibile.

Ci riuscirà facile spiegare il fenomeno, supponendo dapprima che i raggi provenienti dal sole, sensibilmente paralleli, siano di luce monocromatica (§ 172). Un raggio SA (fig. 125), il quale incontri una goccia sferica, subisce una prima rifrazione secondo AB, poi si riflette secondo BE, ed emerge in una direzione EO, formante colla primitiva un angolo di deviazione $SDO = \alpha$. Il raggio EO forma pure lo stesso angolo α colla retta $S'G$ che passa pel sole e per l'occhio O dell'osservatore.

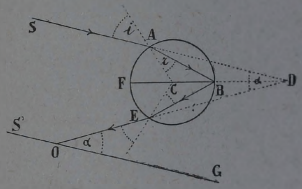


Fig. 125

Ora, l'angolo di deviazione è diverso secondo il punto d'incidenza del raggio solare sulla goccia, cosicchè un fascio di raggi incidenti paralleli dà luogo a raggi emergenti sparpagliantisi in tutti i sensi. Riescono quindi quasi tutti senza effetto sensibile sull'occhio, specialmente se lontano: sono *efficaci* soltanto una parte di essi, quelli che divergono fra loro il meno possibile. A questi corrisponde, se rossi, un angolo di deviazione di circa 42°; se violetti, di circa 40°.

Poichè la luce solare è composta di tutte le luci monocromatiche, si conclude che l'occhio riceverà i raggi rossi efficaci da tutte le goccie di una superficie conica d'asse $S'G$ e di apertura 2·42°, ed i raggi violetti efficaci da tutte quelle di un'altra superficie conica coassiale, d'apertura 2·40°. Si ha così l'arco più interno.

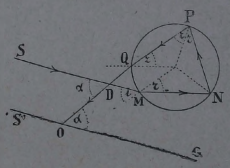


Fig. 126

Il 2° arco è dovuto a due riflessioni dentro le goccie, com'è indicato dalla figura 126; in questo caso l'angolo di deviazione dei raggi efficaci rossi è di circa 51°, e dei violetti di circa 53°.

Passaggio della luce attraverso i corpi.

181 — Se di due mezzi rifrangenti uno $MNM'N'$ (fig. 127) è limitato, un raggio luminoso AI, dopo essere penetrato dal primo mezzo in questo per un punto I, può tornar poi nel mezzo illimitato circostante per un altro punto R. Essendo generalmente le superficie di separazione in I ed R disposte comunque, il raggio uscente RB avrà una direzione molto diversa da quella del raggio incidente AI.

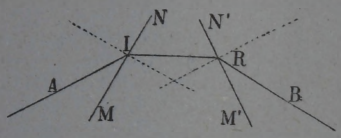


Fig. 127

182 — **Lamine a faccie parallele.** — Il caso più semplice è quello in cui le superficie MN e $M'N'$ sieno piane e parallele fra loro, come avviene in una lastra regolare di vetro (fig. 128). In tal caso il raggio emergente $I'B$ è parallelo all'incidente AI: infatti, dirigendo una visuale ad una stella, ad es. mediante un cannocchiale a reticolo, si vede che la visuale resta diretta alla stella quando si interponga, anche obliquamente, una lastra di vetro a faccie parallele. Da ciò consegue che l'indice inverso di rifrazione, relativo a due mezzi, è uguale all'inversa dell'indice relativo ai medesimi, come abbiamo avvertito nel § 175.

La figura 128 mostra inoltre che il raggio emergente $I'B$ non si trova sul prolungamento del raggio incidente AI: esso risulta alquanto spostato, e lo spostamento è tanto più grande quanto più è spessa la lastra. Ne segue che se attraverso ad una lastra a faccie parallele guardiamo un oggetto molto vicino e la visuale è obliqua alla lastra, l'oggetto ci sembrerà un po' spostato lateralmente rispetto alla detta visuale, e lo spostamento sarà tanto maggiore quanto più è grossa la lastra.

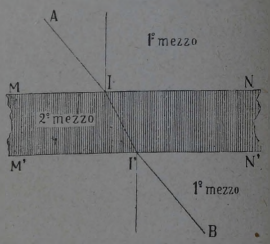


Fig. 128

183 — Prisma. — Se le faccie del corpo trasparente, per le quali entra ed esce il raggio di luce, sono piane, ma non parallele fra loro, il corpo — in ottica — si chiama *prisma*. Ordinariamente il prisma dell'ottica ha la forma di un prisma triangolare, e la luce si fa cadere su una delle faccie laterali, in modo che il piano d'incidenza sia una sezione normale ABC (fig. 129). Allora il raggio rifratto MP e il raggio emergente PR si trovano nel piano della sezione; l'angolo BAC si chiama *angolo rifrangente* del prisma, e la faccia opposta, rappresentata in sezione da BC, *base*. Chiamiamo i l'angolo d'incidenza all'entrata, che dicesi, senz'altro, angolo d'incidenza, ed r il corrispondente angolo di rifrazione; i l'angolo di incidenza all'uscita, ed r' il corrispondente angolo di rifrazione, detto anche *angolo di emergenza*. L'angolo formato dalla direzione del primo raggio SM con quella dell'ultimo PR chiamasi *angolo di deviazione*, e si indica con δ.

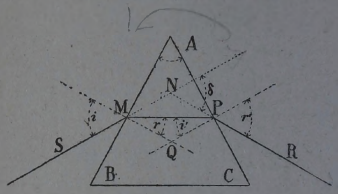


Fig. 129

Osservando il triangolo MNP, si vede che, essendo δ l'angolo esterno, si ha

$$\delta = NMP + NPM.$$

Ma, essendo peraltro

$$NMP = i - r, \qquad NPM = r' - i';$$

si ha, sostituendo,

$$\delta = i - r + r' - i'. \qquad (\alpha)$$

Ora, dal triangolo MQP si ricava:

$$Q = 180^\circ - (r + i'); \qquad (\beta)$$

d'altra parte Q è uno degli angoli del quadrilatero $AMQP$, di cui gli angoli in M e in P sono retti, e quindi Q è supplementare di A, ossia

$$Q = 180^\circ - A; \qquad (\gamma)$$

perciò, combinando la (β) con la (γ), si ottiene

$$r + i' = A. \qquad (7)$$

Sostituendo infine nella (α), risulta

$$\delta = i + r' - A. \tag{8}$$

È questa la formula che lega l'angolo di deviazione con quelli di incidenza e di emergenza del raggio e coll'angolo rifrangente del prisma.

184 — **Deviazione minima.** — Se alle relazioni (7) e (8) ora trovate si aggiungono le altre due

$$sen\ i = n\ sen\ r, \qquad sen\ r' = n\ sen\ i',$$

date dalla 2ª legge della rifrazione, si hanno 4 equazioni, da cui si possono ricavare i valori di 4 qualunque delle quantità che vi figurano, quando sian noti i valori delle altre.

Per mezzo di tali relazioni si può ricercare come varî l'angolo δ di deviazione, al variare dell'angolo i d'incidenza; e si trova che v'è un certo valore dell'angolo i, pel quale δ ha il minimo valore possibile. V'è dunque un *angolo di deviazione minima*.

Ciò del resto si può anche riconoscere subito sperimentalmente. Basta inviare sul prisma ABC (fig. 130) un raggio SM con un angolo d'incidenza assai grande, e diminuire tale angolo a poco a poco, ruotando il prisma nel senso della freccia. Allora il raggio emergente PR ruota esso pure in quel senso, avvicinandosi alla direzione del raggio incidente: ma ad un certo punto prende ad allontanarsene di nuovo, mostrando che si è oltrepassata la posizione di minima deviazione.

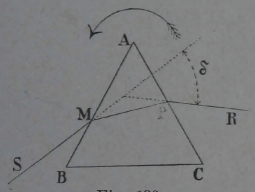


Fig. 130

Quella posizione è tale che per essa l'angolo d'incidenza i è uguale all'angolo d'emergenza r'. Se dunque d è l'angolo di deviazione minima, si ha per le (7) e (8):

$$r = {}^1/_2\ A, \qquad i = {}^1/_2\ (d + A);$$

e quindi può scriversi:

$$n = \frac{sen\ {}^1/_2\ (d + A)}{sen\ {}^1/_2\ A}. \tag{9}$$

A questa formula si ricorre spesso per calcolare gl'indici di rifrazione delle varie sostanze, dopo aver misurato A e d.

Lenti.

185. — Nel caso in cui una o ambedue le superficie di entrata e di uscita del raggio luminoso da un corpo trasparente siano curve, questo prende il nome di *lente*. Noi studieremo soltanto le lenti con superficie sferiche.

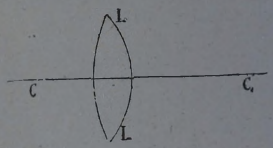


Fig. 131

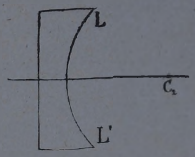


Fig. 132

La retta $C_1 C_2$ (fig. 131) che unisce i due centri C_1, C_2 delle due superficie, chiamasi *asse principale* della lente. In particolare una delle superficie può essere piana (fig. 132); in tal caso l'asse della lente è la retta normale alla superficie piana e passante pel centro di quella sferica.

Secondo la diversa curvatura delle faccie, si possono avere sei specie di lenti — mostrate della figura 133 — che prendono rispettivamente i nomi di biconvessa (1), piano-convessa (2), menisco convergente (3), biconcava (4), piano-concava (5), menisco divergente (6).

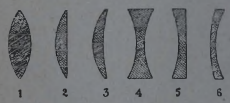


Fig. 133

Le prime tre sono più sottili al contorno che nel mezzo: esse diconsi *convergenti*, perchè un fascio di raggi paralleli, cadendo su una delle faccie, dà luogo ad un fascio di raggi uscenti che convergono in un punto (fig. 134). Le seconde sono invece più sottili nel mezzo che al contorno; e diconsi *divergenti*, perchè un fascio di raggi paralleli si può con esse trasformare in un fascio di raggi divergenti (fig. 135).

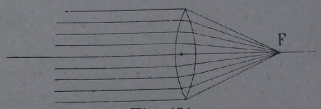


Fig. 134

Noi studieremo soltanto le lenti che abbiano uno spessore piccolo, relativamente al diametro del contorno, che dicesi

diametro della lente; e che abbiano piccola *apertura*, cioè nelle quali sia piccolo l'angolo delle rette che vanno dal centro delle superficie sferiche a due punti diametralmente opposti del contorno. Come tipo di lente convergente prenderemo la lente biconvessa, poichè le proprietà che troveremo per essa si estendono facilmente alle altre due; e similmente, come tipo di lente divergente, prenderemo la biconcava.

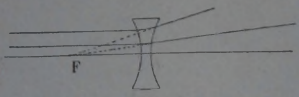


Fig. 135

Lenti convergenti.

186 — Fuochi principali delle lenti convergenti. — Se facciamo cadere sulla lente biconvessa LL' (fig. 136) un raggio RI parallelo all'asse principale, questo, uscendo dalla lente, va ad incontrare l'asse principale in un punto F_1.

Ora, per le lenti di piccola apertura, un ragionamento abbastanza semplice prova che questo punto è prossimamente lo stesso per tutti i raggi paralleli all'asse. Noi ci contenteremo di mostrare ciò sperimentalmente, ricevendo i raggi del sole su di una lente, e orientando questa in modo che il suo asse principale sia parallelo ai raggi solari. Si trova che questi, dopo avere attraversato la lente, vanno a concentrarsi approssimativamente in uno stesso punto F_1 del detto asse.

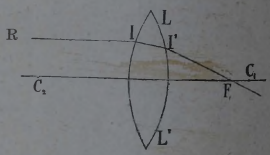


Fig. 136

Un tal punto F_1 ha ricevuto il nome di *fuoco principale* della lente. La sua distanza dalla lente stessa dicesi *distanza focale* e si indica di solito colla lettera f.

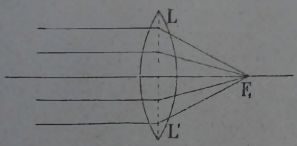


Fig. 137

Nella figura 137, per semplificare il disegno, alle due rifrazioni successive che il raggio subisce si è sostituito un solo cambiamento di direzione, conveniente, nel punto in cui il raggio incontra il piano passante pel contorno della lente. Ciò

è lecito nel caso delle lenti sottili; e quindi noi faremo così.

Ogni lente possiede sempre due *fuochi principali* F_1 e F_2 (fig. 138), situati da parti opposte, e l'esperienza insegna che la distanza dalla lente è la stessa per tutti e due.

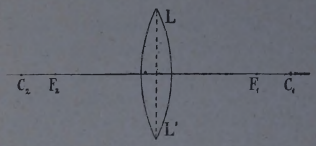


Fig. 138

Reciprocamente, se un punto luminoso si trova in un fuoco principale, i raggi da esso inviati alla lente, ne escono paralleli all'asse principale.

187 — Fuochi coniugati. — Se poniamo un oggetto luminoso, ad es. la fiamma d'una candela *A* (fig. 139), davanti ad una lente convergente *L*, ad una distanza più grande della distanza focale, si vede netta su di uno schermo, collocato ad una distanza conveniente, l'*immagine* della fiamma.

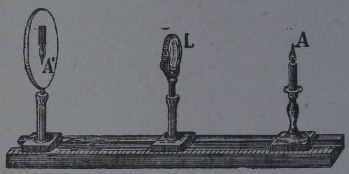


Fig. 139

Questa esperienza dimostra che ad ogni punto dell'oggetto corrisponde sullo schermo un punto *immagine;* ossia, che un fascio di raggi incidenti, uscenti da un punto, dà origine ad un fascio di raggi emergenti passanti pure per un punto.

Di più si osserva che l'immagine è rovesciata; e che, se un punto della fiamma — l'estremità dello stoppino ad es. — si trova sull'asse principale, il punto corrispondente dell'immagine si trova esso pure sull'asse principale.

L'esperienza adunque prova che:

1°. un punto situato sull'asse principale ha la sua immagine su quest'asse;

2.° un punto situato al disopra dell'asse principale ha la sua immagine al di sotto, e viceversa.

Se poi scambiamo fra loro la fiamma e lo schermo, vediamo formarsi ancora l'immagine netta. Perciò potremo anche concludere che:

3.° un punto luminoso e la sua immagine occupano, rispetto alla lente, posizioni fra loro permutabili.

Due punti siffatti, l'uno immagine dell'altro, diconsi *fuochi coniugati*.

188 — Relazione tra i fuochi coniugati. — Distanza focale. — Con calcoli elementari è facile dimostrare che, se si indicano con p e q le distanze rispettive di due fuochi coniugati dalla lente, e con f la distanza focale, si ha tra queste tre quantità la relazione

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}. \qquad (10)$$

In questa formula i valori p e q appariscono scambiabili fra loro: ciò corrisponde al fatto dianzi osservato (§ 187), che un oggetto luminoso e la sua immagine occupano, rispetto alla lente posizioni tra loro permutabili.

Coll'esperienza del § 187 si verifica immediatamente, che la distanza locale, è tanto minore, ossia la lente è — come si dice — tanto *più convergente*, quanto più sono piccoli i raggi di curvatura delle due faccie.

189 — Centro ottico. — Assi secondari. — Le esperienze fatte ci dimostrano che in generale i raggi, nell'attraversare una lente, cambiano di direzione. Ma ciò non succede per tutti; poichè in ogni lente vi è un punto, situato sull'asse principale, che gode della notevole proprietà che i raggi passanti per esso, escono dalla lente paralleli alla loro direzione primitiva.

Tiriamo, infatti, per i centri di curvatura C_1 e C_2 (fig. 140) i due raggi C_1I e C_2I' paralleli fra loro. I piani mn e $m'n'$. tangenti alle due superficie sferiche in I e in I', saranno pure tra loro paralleli, perchè normali a quei due raggi.

Ora, poichè la superficie della lente, nell'intorno di un punto, può ritenersi confusa col piano ivi tangente, è chiaro che, per la rifrazione, un raggio di luce quale II' si può considerare come interno ad una lastra a faccie parallele mn, $m'n'$. Quindi il raggio incidente RI, che ha II' per raggio rifratto, e il raggio emergente $I'S$ sono paralleli fra loro (§ 182).

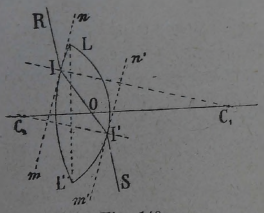


Fig. 140

Sia O il punto in cui il raggio II' incontra l'asse principale.

I triangoli $I'OC_2$ e IOC_1 sono simili, perchè equiàngoli; quindi, chiamando R_1 e R_2 i due raggi di curvatura C_1I e C_2I', si ha

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{OC_1}{OC_2}; \qquad \text{e, dividendo,} \qquad \frac{R_1 - OC_1}{R_2 - OC_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Ma $R_1 - OC_1$ ed $R_2 - OC_2$ sono le distanze del punto O dalle due faccie della lente: e poichè il loro rapporto risulta costante, si deduce che il punto O non varia col variare dei piani tangenti mn e $m'n'$, purchè paralleli fra loro: perciò il punto O dicesi *centro ottico della lente*.

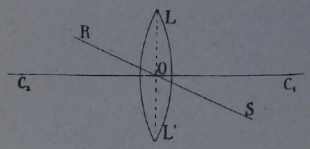


Fig. 141

Se la lente è molto sottile, si può ritenere che un raggio incidente RO (fig. 141), non molto inclinato sull'asse C_1C_2, dia luogo a un raggio emergente diretto, come OS, sul prolungamento del primo; cioè, che qualunque raggio passante pel centro ottico della lente non devii: perciò un tal raggio dicesi *asse secondario* della lente stessa.

Immagini nelle lenti convergenti.

190 — **Immagine di un punto.** — Le cose suesposte permettono di costruire l'immagine di un punto, ed anche di un oggetto, rispetto a una lente convergente.

Sia infatti A (fig. 142) un punto situato fuori dell'asse principale C_1 C_2 della lente L. Sappiamo che i raggi partenti da A debbono andare ad incontrarsi, dopo la rifrazione, in un unico punto A': basterà dunque, per avere l'immagine di A, che noi troviamo l'incontro dei raggi rifratti di due qualunque dei raggi emessi da A. Come primo raggio scegliamo AO che passa per il centro ottico O. Se l'angolo AOC_2 è sufficientemente piccolo, il raggio rifratto $A'O$ è sul prolungamento di AO. Per secondo raggio prendiamo AI, parallelo all'asse principale. Esso si rifrangerà secondo la direzione IF_1, che passa per il fuoco principale F_1.

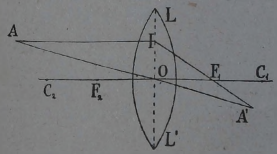


Fig. 142

Il punto A', in cui IF_1 incontra l'asse secondario AOA', è il fuoco coniugato di A.

Invece di AI potremmo anche scegliere AF_2 (fig. 143), che passa per il secondo fuoco principale: questo raggio uscirà dalla lente secondo una direzione IA' parallela all'asse C_1C_2; e il suo incontro coll'asse secondario AO avverrà nello stesso punto A'.

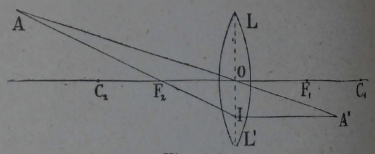


Fig. 143

191 — Immagine di un oggetto. — Sia ora un oggetto AB (fig. 144) dinanzi alla lente. Supponiamolo da essa inzitutto a distanza superiore al doppio della distanza focale, cioè distante dalla lente più del punto H_2, tale che $OA_2 = 2 \cdot OF_2$.

Per determinare l'immagine di AB, cercheremo il fuoco A' coniugato di A, che si otterrà (§ 190) conducendo l'asse

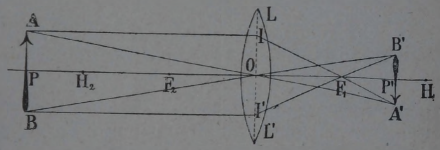


Fig. 144

secondario AO, e il raggio AI parallelo a F_1F_2. Il raggio rifratto IF_1 incontrerà il prolungamento di AO in A'. Analogamente si troverà il fuoco coniugato B' di B. Ora la teoria e l'esperienza provano che i vari punti della retta AB hanno per immagini i punti della retta $A'B'$, purchè i punti A e B non distino troppo dall'asse principale.

Si trova così che l'immagine $A'B'$ è reale, più piccola dell'oggetto e rovesciata rispetto ad esso; e si forma ad una distanza dalla lente minore del doppio della distanza focale. Dunque intanto:

1.° *L'immagine di un oggetto, che disti dalla lente più del doppio della distanza focale, è reale, più piccola dell'oggetto, e situata dalla lente ad una distanza compresa fra la distanza focale e il suo doppio.*

Se l' oggetto AB si avvicina alla lente, l' immagine se ne allontana ed ingrandisce, ma rimane sempre più vicina di H_2 alla lente e più piccola dell' oggetto, finchè questo non arrivi in H_2.

Quando AB è in H_2, si trova che $A'B'$ si forma in H_1 ed è grande quanto l' oggetto. E dunque:

2.° *Se l' oggetto dista dalla lente del doppio della distanza focale, l' immagine, ancora reale e rovesciata, dista dalla lente essa pure del doppio della distanza focale, ed è uguale in grandezza all' oggetto.*

Poichè le posizioni dei punti luminosi e delle immagini sono permutabili, segue subito dal 1° caso che;

3.° *Se l' oggetto è situato dalla lente ad una distanza compresa fra la distanza focale e il suo doppio, l' immagine, sempre reale e rovesciata, è più grande dell' oggetto e dista dalla lente più del doppio della distanza focale.*

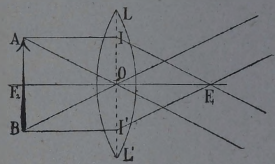


Fig. 145

Supponiamo ora che AB (fig. 145) passi pel fuoco F_2. L' immagine non esiste più. Infatti cercando l' immagine di un punto qualunque dell' oggetto, ad es. di A, troviamo che l' asse secondario AO e il raggio rifratto IF_1 sono paralleli, poichè AI ed OF_1 sono lati paralleli ed uguali del quadrilatero AIF_1O.

Si esprime ciò dicendo che:

4.° *Se l' oggetto è situato alla distanza focale, l' immagine si forma all' infinito ed è infinitamente grande.*

Supponiamo infine che l' oggetto sia collocato tra il fuoco F_2 (fig. 146) e il centro ottico O.

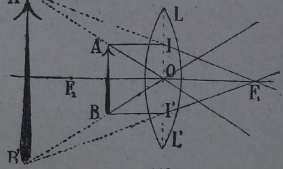


Fig. 146

Allora il quadrilatero AIF_1O è un trapezio, nel quale AI è minore di OF_1. Dunque i prolungamenti del raggio rifratto IF_1 e dell' asse secondario AO si incontreranno in un punto A' situato, rispetto alla lente, dalla stessa parte di A, ma a distanza maggiore; quindi i raggi che escono da A formano,

dopo aver attraversato la lente, un fascio divergente che sembra partire da A'.

Un occhio situato in questo fascio vedrà in A' l'*immagine virtuale* di A.

La costruzione indicata nella figura 146 dimostra poi che $A'B'$ è tanto più grande, quanto più l'oggetto AB è vicino ad F_2. Perciò:

5.° *Se un oggetto dista dalla lente meno della distanza focale, l'immagine è virtuale, diritta e maggiore dell'oggetto, ed aumenta in grandezza col diminuire della distanza dell'oggetto dal fuoco principale.*

192 — Verifica sperimentale. — Si verificano tutte queste leggi usando la disposizione descritta nel § 187. A tal uopo lo schermo e la candela (fig. 147) sono spostabili sopra un regolo graduato, che permette di misurare la distanza dell' oggetto A e dell' immagine A' dalla lente L.

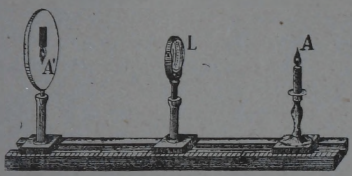


Fig. 147

Si comincia col disporre la fiamma assai lontana: un' immagine netta, piccolissima, della candela si scorge sullo schermo quando è situato al di là del secondo fuoco, e molto vicino a questo. Avvicinando man mano la candela alla lente, dobbiamo allontanare lo schermo perchè vi si formi ben definita l' immagine, ch' è sempre più grande. Troveremo così una posizione in cui A e A' hanno le stesse dimensioni e ugual distanza da L; potremo allora vedere sul regolo che quella distanza è doppia della distanza focale. Avvicinando la fiamma sempre più al fuoco, lo schermo dovrà esser via via allontanato fino a distanza grandissima. Se infine colla candela oltrepassiamo il fuoco, non riusciamo più a raccogliere la immagine sullo schermo; ma ora guardando la fiamma attraverso la lente, ne vedremo l' immagine virtuale, ingrandita e diritta.

Per ogni posizione della candela e dello schermo, le loro distanze dalla lente soddisfano alla formula (10) del § 188.

193 — Relazione tra la grandezza dell' immagine e dell' oggetto. — Sia ancora AB l'oggetto (fig. 148), e $A'B'$ l'immagine.

Notiamo che i triangoli ABO e $A'B'O$ sono simili. Quindi, se chiamiamo o la lunghezza AB dell' oggetto, i quella $A'B'$ della immagine, indicando con p e q le distanze dell' oggetto e dell' immagine dalla lente, si avrà la proporzione

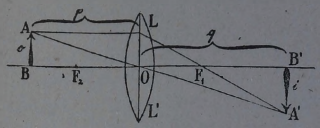


Fig. 148

$$\frac{i}{o} = \frac{q}{p}. \qquad (11)$$

Ma (§ 188) abbiamo tra p e q la relazione

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f};$$

se quindi si elimina q fra queste due equazioni, si ottiene:

$$i = o\,\frac{f}{p - f}. \qquad (12)$$

Questa eguaglianza ci fornisce la grandezza i dell' immagine, se sono note la grandezza dell' oggetto, la sua distanza dalla lente e la distanza focale di questa. Essa rappresenta tutti i risultati che noi abbiamo ricavati dall' esperienza e dalle considerazioni geometriche.

Lenti divergenti.

194 — La teoria delle lenti divergenti è analoga a quella delle convergenti. Basta quindi enunciare le varie proprietà.

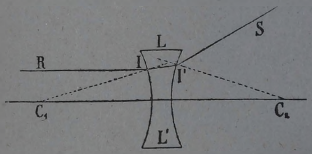


Fig. 149

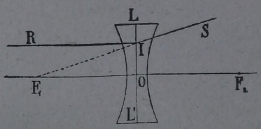


Fig. 150

Un raggio RI (fig. 149), che cada sulla lente, subisce due rifrazioni, percorrendo il cammino $II'S$, con cui si allontana dall' asse principale. Ma anche per le lenti divergenti sottili vale il principio che si può, nelle costruzioni geometriche,

sostituire alle due rifrazioni un' unica deviazione dei raggi, nel punto dove questi incontrano il piano perpendicolare all' asse e passante pel centro ottico.

L' esperienza mostra che:

1.° I raggi incidenti paralleli all' asse principale, come RI (fig. 150), escono dalla lente divergendo secondo direzioni che, prolungate, passano tutte per uno stesso punto F_1, situato sull' asse principale dalla stessa parte dei raggi incidenti. Questo punto si dice *fuoco principale;* esso è un fuoco *virtuale.* Dall' altra parte della lente si ha l' altro fuoco principale, F_2.

2.° I raggi, come PI (fig. 151), che partono da un punto P dell' asse principale emergono secondo direzioni che, prolungate, vanno a passare per un unico punto P', situato pure sull' asse principale, tra il fuoco e la lente, davanti ad essa. Il punto P' è detto *fuoco coniugato di P*, ed è un fuoco *virtuale.*

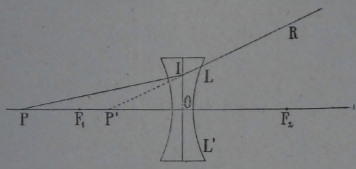


Fig. 151

3.° Il fuoco coniugato di un punto A non situato sull' asse principale (fig. 152) si trova sull' asse secondario AO. Per determinarne la posizione, conduciamo per A un raggio AI parallelo all' asse principale: il prolungamento del raggio emergente dovrà passare per il fuoco F_1. Il punto A' d' incontro della retta IF_1 con AO sarà dunque il fuoco coniugato di A. Esso è sempre *virtuale.*

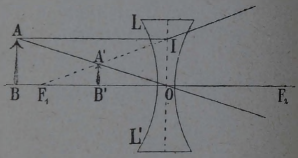


Fig. 152

4.° Una lente divergente dà sempre un' immagine $A'B'$, virtuale, diritta, più piccola dell' oggetto AB posto davanti alla lente stessa (fig. 152): questa immagine è situata fra la lente e il fuoco principale F_1. Ed a misura che l' oggetto si allontana dalla lente, l' immagine si approssima al fuoco principale, e diminuisce via via di grandezza.

Acromatismo.

195 — Acromatismo dei prismi. — Newton riteneva non si potesse deviare, mediante un prisma, un fascio di luce bianca

senza decomporlo. Dolland, invece, riuscì in questo intento fabbricando un prisma di due pezzi costituiti da vetri differenti.

Infatti, a seconda della sua composizione, il vetro gode di proprietà ottiche molto diverse. Così, con un prisma di vetro Flint si ha uno spettro ampio circa il doppio che con un prisma uguale di vetro Crown, e la deviazione dei raggi medî è poco diversa nei due casi. Dando quindi agli angoli rifrangenti dei due prismi valori diversi e convenienti, si può ottenere due spettri ugualmente estesi, che differiscono però assai nella deviazione dei raggi medî. Si capisce dunque come, accoppiando due tali prismi, com'è mostrato dalla figura 153, si possa rjuscire a compensare tra loro le due dispersioni opposte, pur ottenendo una deviazione del raggio che incide sul prisma.

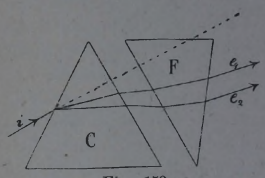


Fig. 153

Questo allora prende il nome di *prisma acromatico*.

196 — Acromatismo delle lenti. — Anche nell'attraversare una lente, un raggio di luce bianca si disperde nei suoi raggi elementari: talchè nel trattare delle proprietà delle lenti, noi abbiamo sempre inteso di riferirsi a raggi di luce monocromatica.

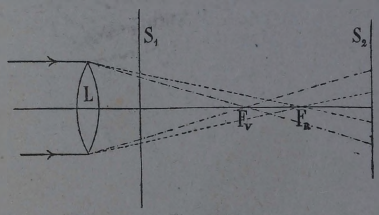


Fig. 154

La dispersione nelle lenti si rende evidente con l'esperienza della figura 154, nella quale un fascio di raggi incidenti paralleli dà luogo a raggi emergenti diversamente deviati: i rossi convergono nel fuoco F_R, i violetti nel fuoco F_V, e gli altri in punti compresi tra questi due. Ponendo uno schermo in S_1, vediamo una macchia bianca orlata esternamente di rosso, e ponendolo in S_2, una macchia bianca orlata in violetto.

Questo fenomeno, noto particolarmente col nome di *aberrazione cromatica* delle lenti, è molto nocivo negli strumenti d'ottica, perchè, per esso, le immagini date dalle lenti semplici mancano di nettezza ed hanno i contorni iridescenti. Si elimina quasi completamente, accoppiando due lenti di vetri differenti, le cui curvature siano così calcolate, che i raggi sian deviati senza essere decomposti. Di solito si unisce ad una lente biconvessa *C* di crown (fig. 155) un menisco divergente *F* di flint. Le lenti così costituite si dicono *lenti acromatiche*.

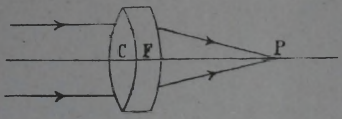


Fig. 155

Occhio e strumenti ottici.

L'occhio.

197 — I raggi luminosi, arrivando al nostro occhio, producono in noi la sensazione visiva degli oggetti. Vediamo come ciò accade.

Il globo dell'occhio (fig. 156) è limitato da una membrana cornea, opaca, bianca, detta *sclerotica*, che nella parte anteriore, più curva e diafana, *a*, costituisce la *cornea*, dietro la quale si trova un piccolo spazio *s*: esso contiene un liquido, chiamato *umore acqueo*, il cui indice di rifrazione è di poco superiore a quello dell'acqua. Questo spazio *s* è limitato posteriormente da una specie di lente biconvessa *c*, detta *cristallino*, formata di sostanza cornea trasparente con un nucleo centrale *n* più duro. Il cristallino, più curvo nella parte posteriore, può cambiare di curvatura per l'azione di muscoli speciali.

Fig. 156

Al di là del cristallino si trova una cavità più ampia *S*, ripiena di un altro liquido, detto *umore vitreo*, il cui indice di rifrazione è uguale a quello dell'umore acqueo. Infine il fondo dell'occhio è tappezzato da una membrana nervosa *r*, la *retina*, che è la parte sensibile del globo oculare.

I raggi luminosi arrivano alla retina passando dal foro *p* di un setto membranoso *i*, opaco, diversamente colorato nei varî individui, detto *iride*; questo foro, che dicesi *pupilla*, si restringe istintivamente quando arriva all' occhio troppa luce, e si allarga quando ne arriva poca.

I centri di curvatura della cornea e delle due faccie del cristallino stanno sopra una stessa retta, che dicesi *asse anatomico* o *asse ottico* dell' occhio.

198 — Occhio ridotto. — I raggi, che penetrano nell' occhio, passano così attraverso un sistema di tre lenti: 1) la lente convesso-concava costituita dall' umore acqueo, limitata anteriormente dalla cornea, e posteriormente dal cristallino; 2) la lente biconvessa costituita dal cristallino; 3) la lente concavo-convessa costituita dall' umore vitreo.

Accurate misure sulla curvatura e sull' indice di rifrazione di queste varie lenti hanno dimostrato che, per i punti di arrivo dei raggi sulla retina, all' insieme di queste lenti si può sostituire un occhio fittizio, chiamato *occhio ridotto*, il quale sia formato da una sostanza unica, che riempia il globo oculare e sia limitata anteriormente da una superficie sferica *HK* (fig. 157), di 5 millimetri di raggio, posta a 7,15 millimetri dietro la cornea *AB*. La sostanza unica deve avere un indice di rifrazione all' incirca uguale a quello dell' acqua, cioè uguale a $\frac{4}{3}$.

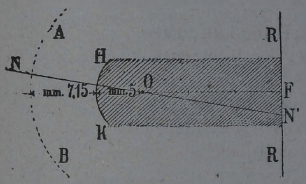


Fig. 157

Nell' occhio ridotto il fuoco principale *F* è collocato sulla retina *RR* a 20 millimetri dalla superficie anteriore *HK*. Il centro *O* di curvatura poi, detto *punto nodale*, gode della proprietà importantissima che tutti i raggi luminosi, come *NON'*, che sono diretti verso di esso, continuano il loro cammino entro l' occhio in linea retta, perchè arrivano perpendicolarmente alla superficie dell' occhio ridotto.

199 — Formazione delle immagini. — Le dimensioni su riferite dell' occhio riguardano il caso in cui l' occhio umano sia in atteggiamento di riposo: i muscoli del cristallino sono

allora rilasciati, e in tali condizioni i raggi provenienti da un punto luminoso lontanissimo — poichè arrivano all'occhio quasi paralleli fra loro — convergono nel fuoco F (fig. 157) il quale, come sopra si è detto, trovasi esattamente sulla retina RR.

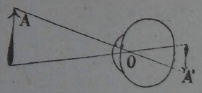


Fig. 158

Che cosa avviene invece se il punto luminoso non è molto lontano? Ricordiamo che quando un punto luminoso si avvicina ad una lente convergente, la sua immagine se ne allontana; e così nell'occhio l'immagine reale dei punti luminosi non molto lontani, se l'occhio è rilasciato, si forma dietro la retina RR. D'altra parte l'immagine A' di ogni punto A (fig. 158) è in linea retta col rispettivo punto luminoso e col punto nodale O, e perciò ogni oggetto avrà nell'occhio in riposo un'immagine reale capovolta, posta dietro la retina; più piccola dell'oggetto se esso non è vicinissimo all'occhio.

200 — Accomodamento dell'occhio. — Ma affinchè la visione riesca ben nitida, *è necessario che l'immagine dell'oggetto si formi sulla retina;* e ciò, in un occhio in riposo — come abbiam visto or ora — succede soltanto per gli oggetti lontanissimi.

Avviene perciò, quando si deve osservare un oggetto vicino — quando, per esempio, si deve leggere un libro — che i muscoli dell'occhio agiscono istintivamente sul cristallino in modo da farne aumentare la curvatura, e da far quindi diminuire la distanza focale dell'occhio: così l'immagine, che prima si formava dietro la retina, viene a formarsi sulla retina stessa. Questa proprietà che ha l'occhio di potere, entro certi limiti, deformarsi in modo da vedere con nettezza anche gli oggetti vicini, dicesi *accomodamento*. Essa è posseduta nel medesimo grado dalle persone che hanno l'occhio normale e la medesima età.

201 — Presbitismo. — La facoltà dell'accomodamento si va perdendo a poco a poco coll'avanzarsi degli anni, e sembra ormai accertato che ciò sia dovuto al fatto che il nucleo del cristallino — il quale, come fu detto, è più duro della scorza che lo inviluppa — va sempre più ingrandendosi, sino ad occupare interamente il volume della lente; e così viene a perdersi la deformabilità di questa.

La diminuzione e la scomparsa della facoltà di accomodamento si dice *presbitismo*, e quanto abbiamo detto spiega perchè, di regola, i vecchi vedono bene gli oggetti lontani, ma non quelli vicini.

Si supplisce alla mancata facoltà di accomodamento usando *lenti convergenti*, le quali, accrescendo il potere convergente dell' occhio, agiscono nello stesso senso in cui agisce nei giovani l' istintivo aumento di curvatura del cristallino.

202 — **Ametropie visive e loro correzione.** — Oltre a questo difetto dell' occhio, altri se ne possono verificare, che provengono dalla conformazione anormale dell' occhio stesso. Molti individui ad occhio riposato non hanno esattamente il fuoco principale sulla retina; in tal caso l' occhio si dice *ametropico*, mentre, per contrapposizione, si dice *emmetropico* l' occhio che sia esente da tale difetto.

Le principali ametropie sono le seguenti:

a) Il *brachimetropismo* o *miopia*, che si ha quando la distanza focale è troppo corta, a cagione di troppo grande potere convergente dei mezzi dell' occhio, o di troppa profondità di questo; allora l' immagine degli oggetti lontani si forma avanti la retina (fig. 159), e poichè l' accomodamento, se interviene, ha per effetto di aumentare il potere convergente, e quindi di spostare l' immagine ancora più in avanti, è chiaro che i miopi, fino a quando sono giovani, non vedono bene che al di qua di un certo punto *R*, chiamato il *punto remoto del miope*.

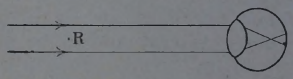


Fig. 159

Mediante una *lente divergente L* (fig. 160) di appropriata distanza focale si può fare in modo che i raggi provenienti da un punto lontanissimo giungano all'occhio del miope come se provenissero dal punto remoto *R*, e allora l' occhio del miope vien messo nelle stesse condizioni di un occhio normale.

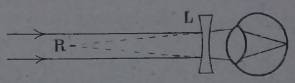


Fig. 160

b) L' *ipermetropismo*, che si ha quando la distanza focale dell' occhio è troppo grande, per troppo piccolo potere convergente dei mezzi dell' occhio, o troppo poca profondità di

questo; allora l' immagine degli oggetti lontanissimi, a occhio riposato, si formerebbe dietro la retina (fig. 161): mercè l'accomodamento l' occhio può istintivamente portarla in avanti fino a farla cadere sulla retina. Ma questo accomodamento è a scapito di quello che è necessario fare quando si vuole vedere distinto anche un oggetto vicino; e perciò gli ipermetropici non vedono bene che al di là di un certo punto, detto il *punto prossimo dell' ipermetropico*.

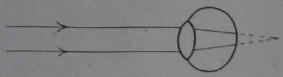


Fig. 161

Mediante una *lente convergente L* (fig. 162) di tale distanza focale, da far convergere sulla retina i raggi provenienti da oggetti lontanissimi senza sforzo di accomodamento, un occhio ipermetropico vien messo nelle stesse condizioni di un occhio normale.

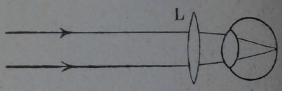


Fig. 162

La *numerazione delle lenti*, nella pratica oculistica, si faceva un tempo indicando la loro *distanza focale espressa in pollici*. Ma poichè v' è differenza fra i pollici usati nelle varie nazioni, così oggigiorno si preferisce un altro sistema, più razionale, di numerazione, assegnando per ogni lente la *inversa della distanza focale espressa in metri*. Si viene così ad assegnare il numero *1* alle lenti, sia convergenti che divergenti, che hanno la distanza focale di 1 metro: esse si chiamano lenti di *una diottria*. Una lente di 2 diottrie ha la distanza focale di $^1/_2$ metro; una lente di 3 diottrie l' ha di $^1/_3$ di metro; e così via.

203 — Persistenza delle sensazioni visive. — Quando l' occhio ha ricevuto un' impressione luminosa, cessando l' azione della luce, la sensazione resta ancora per un tempo brevissimo, che si valuta di circa $\frac{1}{10}$ di secondo.

Difatti, si prenda un disco *D* di cartone (fig. 163), munito di una corona di fori sul contorno, e che si possa ruotare intorno al suo asse, svolgendo la funicella *A* che vi è avvolta. Collochiamo il disco sul tragitto di un fascio di raggi solari *XY*, in modo che questo possa passare per i fori: raccogliendo

i raggi su di uno schermo, vedremo su questo la luce intermittente quando il disco gira molto lentamente, e stabile invece quando gira tanto rapidamente che ogni interruzione del fascio luminoso duri meno di $\frac{1}{10}$ di secondo.

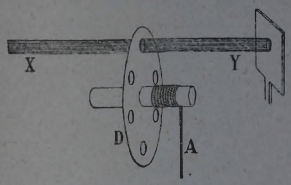


Fig. 163

In causa di questa persistenza delle sensazioni, se facciamo passare rapidamente davanti agli occhi un punto lucente, vediamo una linea luminosa. E se facciamo passare una serie di figure, che rappresentino le varie fasi di un determinato movimento, ciascuna delle immagini successive viene percepita quando ancora non è cessata la sensazione dell'immagine precedente, cosicchè l'occhio segue le varie fasi dell'azione, come se assistesse realmente al suo svolgersi.

204 — **Cinematografo.** — Su di ciò appunto è fondato il *cinematografo*.

In esso si ha una serie di fotografie di una scena animata, prese ad intervalli brevissimi di tempo, succedentisi sopra una

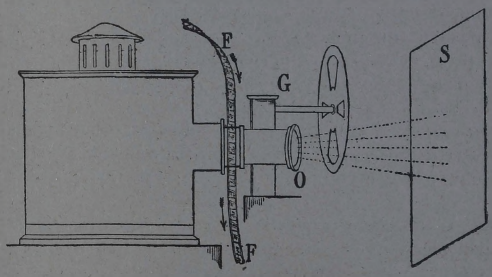


Fig. 164

lunga pellicola fotografica *FF* (fig. 164), che si fa scorrere — fortemente illuminata da un'intensa sorgente — davanti ad un sistema *O* di lenti convergenti, detto *obbiettivo*. Si forma così sopra uno schermo *S*, a conveniente distanza, l'immagine reale molto ingrandita delle figure. Però è necessario fare in modo,

mediante un opportuno congegno *G*, che le varie fotografie abbiano velocità quasi nulla quando sono di fronte all'obbiettivo, e che mentre si sostituiscono l'una all'altra, s'interrompa momentaneamente il passaggio alla luce.

In tal modo si presentano sullo schermo, a rapidissimi intervalli, le successive figure, e si ha l'illusione completa della viva realtà.

205 — **Percezione del rilievo.** — Quando si guarda un oggetto in rilievo, e si porta l'occhio in posizioni diverse, cambiano gli aspetti dell'immagine che se ne riceve sulla retina; perchè ogni volta si vedono taluni punti nuovi e si perdono di vista punti che vedevansi prima; e perchè due lunghezze uguali — come gli spigoli *AB* e *BC* di un cubo (fig. 165) — appaiono disuguali, sembrando più corta quella ch'è osservata più di sbieco.

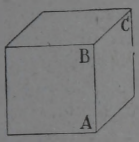


Fig. 165

Onde, per constatare se sia o no in rilievo una figura situata di fronte a noi, per es. la cornice di un quadro, si sposta l'occhio a destra e a sinistra, e si nota se cambia l'aspetto dell'immagine. Da questi cambiamenti d'aspetto — ed, insieme, dal giuoco delle ombre — ci è data la percezione del rilievo.

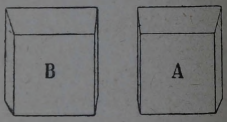


Fig. 166

Se poi l'oggetto è molto vicino, l'immagine *A* data dall'occhio destro (fig. 166) è già diversa da quella *B* data dall'occhio sinistro; e la fusione delle due differenti sensazioni, che contemporaneamente riceviamo dai due occhi, produce — anche da sola — la percezione del rilievo.

206 — **Stereoscopio.** — Segue da ciò che qualsiasi figura disegnata sopra un piano, non può apparirci in rilievo, perchè non sono differenti le immagini che di essa si formano nell'occhio destro e nel sinistro. Al contrario, se di uno stesso oggetto si fanno due disegni diversi *A* e *B* (fig. 167), simili alle due immagini che di esso si hanno quando sia visto rispettivamente dai due occhi, si può ottenere la sensazione del rilievo presentando — con opportuni artifizî — ai due occhi separatamente le immagini dei due disegni sovrapposte in *C*. Gli strumenti a ciò destinati si chiamano *stereoscopi*.

Uno dei più comuni è rappresentato nella figura 168. I due disegni dell'oggetto si pongono a lato l'uno dell'altro sul so-

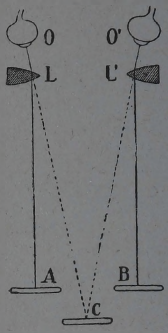


Fig. 167

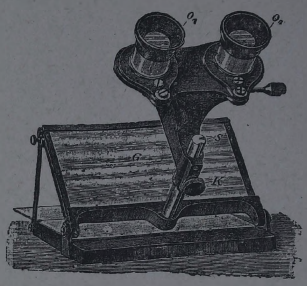


Fig. 168

stegno G, e si guardano mediante gli oculari O_1 e O_2. Si regola poi la distanza di questi da G, facendo scorrere lungo l'asticella S il loro sostegno K.

Strumenti ottici.

207 — Apparecchio di proiezione. — Per ottenere su di uno schermo un'immagine reale, grande, di un oggetto, onde renderlo ben visibile a molte persone insieme, si adopera l'*apparecchio di proiezione*.

Esso è costituito (fig. 169) di un *obbiettivo A*, ch'è una lente, o un sistema di lenti, che serve a dare l'immagine reale dell'oggetto posto in O; di un'intensa sorgente di luce S, per lo più un arco elettrico, che serve ad illuminare fortemente l'oggetto, onde l'immagine riesca ben luminosa; e di un *condensatore L*, ch'è una lente o una coppia di lenti piano-convesse, con cui si concentra sull'oggetto la luce della sorgente.

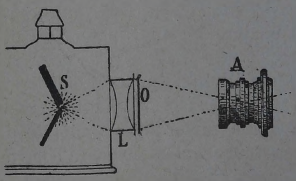


Fig. 169

Con tale apparecchio si possono proiettare sia figure e fotografie, come si usa oggigiorno nelle conferenze, sia anche strumenti in azione, ad es. termometri, elettrometri, ecc., disposti convenientemente, per le dimostrazioni sperimentali nelle scuole.

208 — Lente di ingrandimento o microscopio semplice. — Se un oggetto AB (fig. 170) si trova tra una lente convergente e il suo fuoco, l'immagine $A'B'$ è virtuale, diritta e ingrandita; e quindi ad un occhio posto dietro la lente l'oggetto apparirà di dimensioni maggiori.

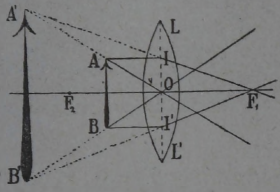


Fig. 170

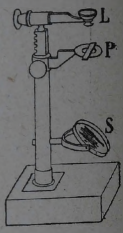


Fig. 171

Una lente convergente L (fig. 171) adoperata in questo modo — e montata, per comodità, sopra un sostegno col porta-oggetti P e collo specchietto S con cui si concentra sull'oggetto la luce del cielo — prende il nome di *microscopio semplice*.

209 — Microscopio composto. — Un ingrandimento molto maggiore si ottiene col *microscopio composto*. Esso è costituito da due sistemi di lenti, chiamati rispettivamente *obbiettivo* e *oculare*. L'obbiettivo equivale ad una lente O di fuoco molto corto (fig. 172), e l'oculare ad una lente L di distanza focale assai maggiore.

Si dispone l'oggetto, fortemente illuminato, in C, al di là del fuoco F dell'obbiettivo. Se ne ha così un'immagine reale, rovesciata e ingrandita in I, la quale viene a trovarsi più vicina all'oculare L che non il suo fuoco F'. Si formerà così in I' un'immagine virtuale, diritta e ingrandita della prima immagine I.

Il rapporto fra le grandezze dell'immagine finale I' e dell'oggetto C si chiama *ingrandimento* del microscopio. Esso

è uguale evidentemente al rapporto fra le grandezze di I' e di I, moltiplicato per il rapporto fra quelle di I e di C: ossia è *uguale al prodotto dei due ingrandimenti dell' oculare e dell' obbiettivo.*

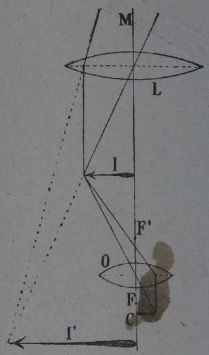


Fig. 172

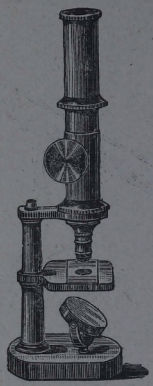


Fig. 173

Nella figura 173 è disegnato un microscopio completo. Il tubo che porta il sistema ottico, per mezzo d' un bottone a cremagliera, può essere avvicinato opportunamente all' oggetto, che si dispone sull' apposito porta-oggetti e si illumina collo specchietto sottostante.

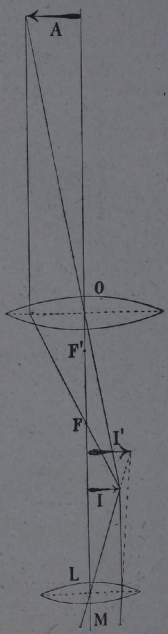


Fig. 174

210 - Cannocchiale. — Per avere nell' occhio un' immagine degli oggetti lontani più grande di quella che si ha ad occhio nudo, cioè per vederli come se fossero più vicini, si adopera un sistema di lenti chiamato *cannocchiale*.

È composto di una lente convergente O, l' *obbiettivo* (fig. 174), che produce pochissimo al di là del suo fuoco F un' immagine reale I piccolissima e rovesciata dell' oggetto lontano A; e di un' altra lente convergente L (l' *oculare*), disposta in modo che l' immagine I si trovi fra il suo fuoco F' e la lente stessa. L' oculare fa da microscopio semplice rispetto a questa immagine, cioè dà di essa una nuova immagine I',

virtuale, più grande e diritta rispetto a quella, e perciò *rovesciata* rispetto all' oggetto.

Però tale immagine non è più grande dell' oggetto, ha soltanto maggiore la *grandezza apparente*, cioè l' angolo for-

Fig. 175

mato dai raggi che dall' occhio vanno ai suoi estremi. L' occhio posto in M vedrà dunque l' oggetto come se quello si fosse avvicinato.

Le due lenti sono montate alla estremità di un tubo (fig. 175); e di solito al loro posto, invece di lenti semplici, si adoperano sistemi di lenti.

211 — Binocolo a prismi. — I *binocoli a prismi*, che si costruiscono da pochi anni, sono la riunione di due cannocchiali (uno per occhio), in ciascuno dei quali due *prismi a riflessione totale* — usati come nella figura 176 — permettono di ridurre la lunghezza del tubo con un tortuoso cammino dei raggi, e al tempo stesso raddrizzano l'immagine data dall' obbiettivo.

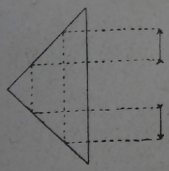


Fig. 176

Fig. 177

Come questo raddrizzamento abbia luogo, si comprende immediatamente dalla figura 177. Il prisma P opera il raddrizzamento della immagine nel senso verticale, l' altro prisma P' il raddrizzamento nel senso orizzontale.

212 — **Cannocchiale terrestre.** — Si suole pure raddrizzare l' immagine I fornita dall' obbiettivo del cannocchiale, mediante una lente (o sistema di lenti) R (fig. 178), posta tra l' obbiettivo e l' oculare. Essa ci dà della I una immagine I_1 uguale e rovesciata, e quindi diritta rispetto all' oggetto; e di questa nuova immagine si ha, mediante l' oculare L, l' immagine virtuale I', che è quella che si vede.

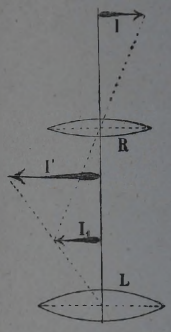


Fig. 178

213 — **Cannocchiale di Galileo.** — Nel *cannocchiale di Galileo* l' oculare L (fig. 179) è costituito da una semplice lente divergente. L' obbiettivo O produrrebbe dell' oggetto una immagine reale e capovolta I: ma i raggi che andrebbero a costituire questa immagine vengono accolti, prima del loro incontro, dalla lente biconcava L, che li rende divergenti: e così ad un occhio posto dietro di essa sembra che provengano dall' immagine virtuale I'.

Questo cannocchiale, che fu il primo rivolto al cielo, non consente un forte ingrandimento.

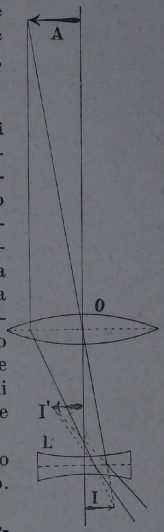


Fig. 179

214 — **Binocolo comune.** — Due cannocchiali di Galileo, accoppiati in modo da servire pei due occhi contemporaneamente, costituiscono il *binocolo comune*, che si usa a teatro.

Ottica fisica.

Velocità della luce.

215 — Nello studio che fin qui abbiamo fatto delle leggi dell' ottica, non ci siamo curati di conoscere se un fenomeno luminoso, prodotto in un dato punto dello spazio, sia immediatamente percepito dall' occhio di un osservatore situato a

distanza, o se la luce impieghi un determinato tempo a passare da un punto ad un altro.

Galileo fu il primo a porre tale questione, che egli però non riuscì a sciogliere per insufficienza di mezzi. Spetta al Röemer il merito di avere per il primo provato, con un metodo astronomico basato sullo studio della durata di rivoluzione dei satelliti di Giove, che la luce impiega un tempo brevissimo, ma finito, a percorrere uno spazio, e che la propagazione avviene con velocità costante negli spazi interplanetari.

L' esito fortunato della determinazione del Röemer fu dovuto all' aver egli usufruito di distanze estremamente grandi, quali sono quelle che intercedono fra i pianeti. Molto più tardi fu possibile fare la misura della velocità della luce, ricorrendo soltanto a distanze accessibili sulla terra; e i corrispondenti metodi furono detti perciò *metodi terrestri*.

216 — **Metodo di Fizeau per la determinazione della velocità della luce.** — Il primo di tutti è dovuto a Fizeau.

Una ruota dentata *R* (fig. 180) può essere posta in rapido movimento di rotazione mediante un apparecchio di orologeria.

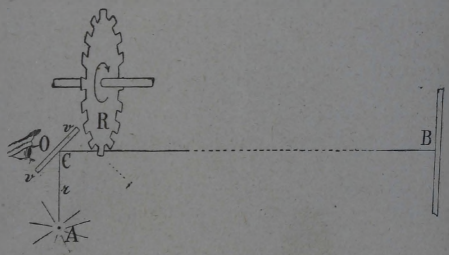


Fig. 180

Un raggio di luce *r*, partente dalla sorgente luminosa *A*, si riflette sulla lastra di vetro *vv* e passa per l' intervallo *i* di due denti della ruota. Indi, dopo aver percorso un certo spazio *CB*, si riflette normalmente sopra uno specchio *B*, che lo rimanda indietro sul suo stesso cammino.

Se la velocità della ruota è piccola, il tempo impiegato dal raggio luminoso nell' andare e nel tornare, è minore di quello occorrente affinchè l' intervallo *i* sia sostituito dal dente che lo segue; e il raggio nel ritorno passerà per lo stesso intervallo.

Allora un occhio situato in O vedrà, attraverso la lastra vv, la sorgente A, riflessa nello specchio B.

Aumentando gradatamente la velocità della ruota, si riuscirà a far trovare al raggio che ritorna, un dente invece di un intervallo. In tal caso l' occhio posto in O non vedrà la luce riflessa da B.

Aumentando ancora la velocità della ruota, e precisamente raddoppiandola, il raggio di luce sarà di ritorno sulla ruota allorquando l' intervallo, pel quale era uscito, è stato sostituito dall' intervallo successivo; e perciò l' osservatore posto in O riceverà ora l' impressione luminosa.

La luce dunque, a percorrere il tratto RB di andata e quello BR di ritorno, impiega un tempo t uguale a quello che occorre affinchè, pel moto della ruota, nel primo caso a un intervallo sia sostituito un dente, e nel secondo caso ad un intervallo sia sostituito il successivo.

Perciò la velocità della luce è data dal quoziente $\frac{2 \cdot RB}{t}$, dove t si calcola facilmente, in un caso o nell' altro, dal numero dei denti della ruota e dai giri che essa compie in un secondo.

La velocità della luce è estremamente grande. Nel vuoto, e con molta approssimazione nell' aria e negli altri gas, essa ha il valore di 300.000 chilometri per minuto secondo.

Ipotesi ondulatoria della luce.

217 — Interferenza della luce. — Per meglio studiare le modalità della propagazione della luce, ricorriamo al seguente esperimento.

In una camera tenuta all' oscuro facciamo cadere su di una lente convergente L (fig. 181) i raggi di una stretta fenditura verticale illuminata con luce monocromatica, ad es. luce rossa. Se ne formerà un' immagine reale, la cui traccia sul piano orizzontale della figura sia il punto O.

Sul cammino dei raggi provenienti da quest' immagine disponiamo verticalmente due specchi, facenti un angolo vicino ai 180°, le cui traccie sul piano della figura sieno SK ed $S'K$.

Uno schermo posto in QR verrà illuminato in parte dalla luce riflessa dallo specchio SK, e in parte da quella riflessa da $S'K$. Per una posizione conveniente dello schermo, vi sarà

una porzione VW di esso illuminata da tutti e due gli specchî: però, in luogo di un'illuminazione uniforme, vedremo nella regione VW disegnarsi una serie di striscie brillanti rosse, ver-

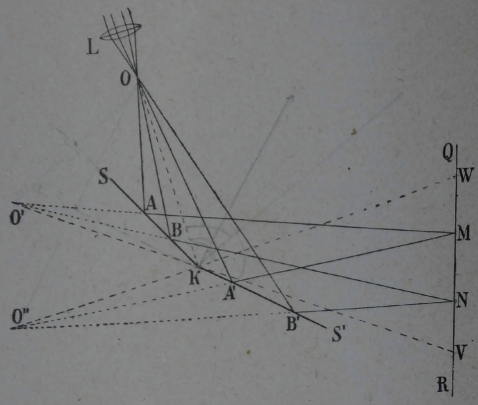


Fig. 181

ticali, separate da striscie oscure, tutte della stessa larghezza (fig. 182).

Queste striscie si chiamano *bande*, o *frangie*, *di interferenza*, e il fenomeno è detto *interferenza della luce*.

Tale fenomeno, infatti, fra tutti quelli che abbiamo studiato fin qui, presenta maggiore analogia col fenomeno dell'interferenza dei suoni (Vol. I, § 271).

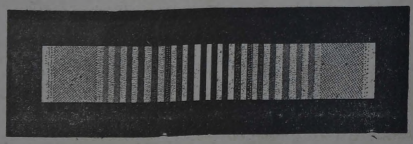


Fig. 182

Là si avevano due sorgenti sonore, situate in due punti diversi, che inviavano onde verso una stessa regione dello spazio: qui si hanno due sorgenti luminose O' e O'', immagini di O, che inviano raggi sullo schermo QR, su cui si formano le frangie. Nel caso dell'interferenza dei suoni si ottenevano,

all' incontro delle onde, zone in continuo moto (ventri) alternate con zone in continuo riposo (nodi), poste a uguale distanza fra loro: qui si hanno, all' incontro dei raggi, bande chiare e bande oscure, a distanze uguali.

L' analogia dei due fenomeni suggerisce l' ipotesi che la luce sia, come il suono, un fenomeno ondulatorio.

218 — **Propagazione della luce.** — Tale ipotesi — che meglio di tutte si adatta alla spiegazione dei fenomeni luminosi — si può formulare così.

La luce è dovuta a un movimento vibratorio, che si propaga con velocità costante. Poichè la propagazione della luce si effettua anche nel vuoto, dovremo ammettere anche in esso l' esistenza di un mezzo imponderabile, e quindi immateriale, il quale possa vibrare: a siffatto mezzo diamo nome di *etere cosmico*, e diciamo che in esso si effettuano e si propagano le vibrazioni a cui sono dovuti i fenomeni luminosi.

Una particella d' etere, allontanata dalla posizione di equilibrio da un' azione qualunque, al cessare di questa azione si mette ad oscillare da una parte e dall' altra della detta posizione. Queste oscillazioni, al pari di quelle elastiche a cui è dovuto il suono, si ritengono isocrone, tali cioè che il periodo sia indipendente dall' ampiezza. La sorgente luminosa ha per ufficio di mantenere il movimento vibratorio dell' etere, precisamente come un diapason mantiene le vibrazioni acustiche dell' aria.

Inoltre, la propagazione della luce non essendo istantanea, dovremo qui pure supporre che una particella lontana non entri in vibrazione, se non dopo un certo tempo dacchè si è messo a vibrare il punto da cui ha origine l' eccitazione luminosa.

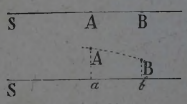


Fig. 183

Se quindi due particelle A, B (fig. 183) sono situate a distanza differente dalla sorgente S, in generale non saranno nella stessa fase (Vol. I, § 250), cioè non ripasseranno contemporaneamente per le loro posizioni di riposo a, b con moto nello stesso senso.

Supponiamo ora che due particelle A, A' (fig. 184) si trovino sulla direzione della propagazione, ad una distanza λ tale che la luce, per propagarsi dall' una all' altra, impieghi un tempo T uguale al periodo. In tale caso A' comincia a vibrare

quando A ha compiuto una vibrazione completa e sta per cominciarne una seconda: A e A' sono cioè nella stessa fase. La distanza λ percorsa nello spazio dal moto ondulatorio durante un periodo dicesi anche in ottica *lunghezza d' onda* (Vol. I, § 252).

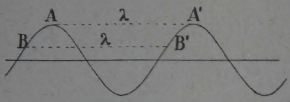


Fig. 184

Dalla teoria ondulatoria segue immediatamente che, se due particelle hanno dalla sorgente distanze che differiscono di una lunghezza d' onda o di un numero intero di lunghezze d'onda, esse, in ogni istante, hanno sia gli spostamenti sia le velocità eguali e nello stesso senso; e se invece hanno dalla sorgente distanze che differiscono di una mezza lunghezza d' onda, o di un numero dispari di mezze lunghezze d' onda, hanno, in ogni istante, sia gli spostamenti sia le velocità eguali e contrarie.

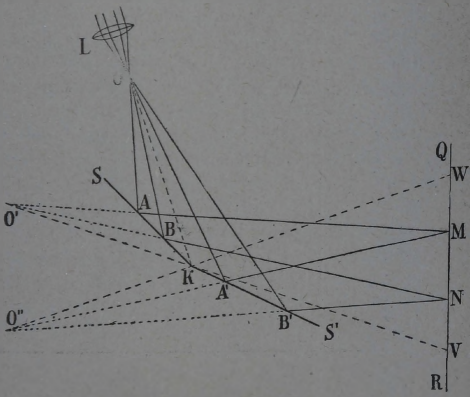


Fig. 185

219 — **Spiegazione delle frangie d' interferenza.** — Mediante questa deduzione è facile interpretare il fenomeno delle frangie.

In ogni punto M (fig. 185), della regione VW dello schermo illuminata dai due specchi, giunge un raggio luminoso OAM riflesso dallo specchio KS, e un raggio $OA'M$ riflesso dallo specchio KS'. E poichè la luce è monocromatica, a tutti e due i raggi spetterà la stessa lunghezza d' onda.

Supponiamo che i due percorsi OAM, $OA'M$ (uguali rispettivamente a $O'M$ e $O''M$) differiscano fra loro di un numero intero di lunghezze d' onda, cioè di un numero pari di mezze lunghezze d' onda: gli spostamenti apportati in M dai raggi OAM, $OA'M$ saranno, in ogni istante, eguali e nello stesso senso, e quindi si avrà in questo punto una frangia luminosa.

Se invece in un altro punto N giungono due raggi OBN, $OB'N$ i cui percorsi differiscano di un numero dispari di mezze lunghezze d' onda, la particella in N, essendo sollecitata a muoversi in direzioni opposte e con velocità uguali, resterà in riposo; perciò in N vi sarà una frangia oscura.

Lunghezze d' onda e velocità della luce.

220 — **Misura delle lunghezze d' onda.** — Dalla larghezza delle frangie (cioè dalla distanza delle linee mediane di due frangie successive) si può calcolare la lunghezza d' onda della luce, quando sia noto il rapporto fra la distanza $O'O''$ delle due immagini e la distanza di esse dallo schermo.

Sperimentando successivamente con luce di colore differente, si è riconosciuto che, lasciando inalterate tutte le altre condizioni, la larghezza delle frangie varia col colore, e decresce, per i successivi colori dello spettro, dal rosso al violetto. È mestieri quindi concludere che la lunghezza d' onda è differente pei diversi colori, e decrescente al crescere della rifrangibilità.

Si è trovato così che la lunghezza d' onda corrispondente alla luce rossa è circa 0,78 millesimi di millimetro, ossia (come più comunemente si scrive) 0,78 μ, ove μ è il simbolo del *micron*, che è $\frac{1}{1000}$ di millimetro; e per gli altri colori:

Aranciato	0,59 μ	Azzurro	0,45 μ
Giallo	0,55 »	Indaco	0,41 »
Verde	0,50 »	Violetto	0,39 ».

221 — **Propagazione nei diversi mezzi.** — Siccome la lunghezza d' onda λ è la distanza alla quale, con moto uniforme, si propaga la luce nel tempo T di una vibrazione, ossia durante un periodo, si ha, indicando con v la velocità di propagazione:

$$\lambda = v\,T. \qquad (13)$$

Ora, osservazioni astronomiche e considerazioni teoriche han condotto ad ammettere che nel vuoto, ossia nell' etere libero, la velocità sia la stessa per luci di ogni colore. Da ciò segue che il periodo di vibrazione è differente per le varie luci monocromatiche, ed è proporzionale alla rispettiva lunghezza d' onda nel vuoto.

Foucault e Michelson hanno poi trovato che la velocità della luce di un dato colore è nei mezzi ponderabili sempre minore che nel vuoto, e che *il rapporto delle velocità di propagazione in due mezzi è uguale all' indice di rifrazione relativo al passaggio dal primo al secondo di essi*. Se dunque supponiamo che uno dei mezzi sia il vuoto, in cui la velocità è V, dovremo avere per un mezzo qualunque d' indice assoluto n, e in cui la velocità sia v:

$$n = \frac{V}{v}. \qquad (14)$$

Questa legge, essendo pure voluta dalla teoria ondulatoria della luce, è una delle più belle conferme di quella teoria. Da essa si ricava che la velocità v in un dato mezzo è — al pari dell' indice di rifrazione n — variabile da colore a colore: diminuisce andando dal rosso verso il violetto.

Ciò che rimane, per un dato colore, eguale in tutti i mezzi è il periodo di vibrazione; come resta eguale il periodo, e quindi l' altezza di una nota, quando il suono si trasmette in uno o in un altro mezzo. Talora però si suole indicare le varie luci, anzichè col loro periodo, colla lunghezza d' onda loro spettante nel vuoto.

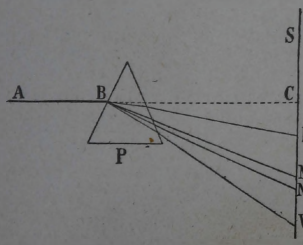


Fig. 186

222 — Luce bianca. — Colori complementari. -- Abbiamo veduto (§ 172) che un fascio AB di luce bianca (fig. 186), attraversando il prisma di vetro P, si disperde in uno spettro luminoso RV. Ad ogni colore dello spettro corrisponde una diversa deviazione dalla direzione primitiva AB, e perciò un indice di rifrazione differente. Dovremo quindi concludere che la luce bianca è formata da un insieme di *radiazioni* di periodo diverso.

Siccome peraltro i colori nello spettro RV si susseguono con continuità, le radiazioni esistenti nella luce bianca sono in numero infinito. E se noi abbiamo la percezione di sette colori soltanto, ciò dipende dalla limitata facoltà di analisi del nostro organo visivo. Infatti la fisiologia c' insegna che nell' occhio esiste un numero limitato di organi sensibili alle radiazioni, e che le specie di essi si possono ridurre essenzialmente a tre.

Ogni radiazione semplice, caratterizzata dal suo periodo di vibrazione e dalla sua intensità, cadendo sulla retina, agisce simultaneamente su questi tre organi, e quindi si ha una triplice sensazione nervosa. Quando l' intensità della eccitazione è uguale per tutti i tre organi, si ha l' impressione della luce bianca.

Ora, una data radiazione monocromatica produrrà nei tre organi tre eccitazioni di intensità a, b, c, in generale diverse fra loro; e un' altra radiazione, tre eccitazioni di intensità a', b', c'. Le due radiazioni insieme produrranno quindi tre eccitazioni di intensità $a + a'$, $b + b'$, $c + c'$; e quando sia

$$a + a' = b + b' = c + c',$$

si avrà la sensazione della luce bianca.

Ne risulta che la luce bianca si può produrre combinando appropriatamente le infinite radiazioni semplici a due a due, e quindi in infiniti modi.

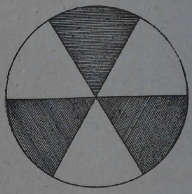


Fig. 187

Quando due colori, semplici o composti, sovrapposti danno la sensazione della luce bianca, essi diconsi *complementari*.

È facile verificare se due colori sono complementari, approfittando della persistenza delle sensazioni visive (§ 203). Si dipinga un disco a settori alternati di un colore e dell' altro (fig. 187), e lo si ponga in rapida rotazione: se si otterrà la sensazione del bianco, i due colori saranno complementari.

Studio sommario delle radiazioni.

223 — Modo di formare uno spettro puro. — Per ottenere uno spettro tale che in ogni suo punto cada una sola radiazione, per ottenere, cioè, quello che si chiama uno *spettro puro*, si ricorre alla disposizione seguente.

La sorgente luminosa K (fig. 188) di cui si vuole analizzare la luce si colloca dietro uno schermo SS che reca una sottile fenditura F, e si pone una lente convergente L a tale distanza da SS, da produrre un'immagine reale della fenditura in F_1. Al di là della lente si mette un prisma P, con gli spigoli paralleli alla fenditura; il quale devia i raggi che cadono in O,

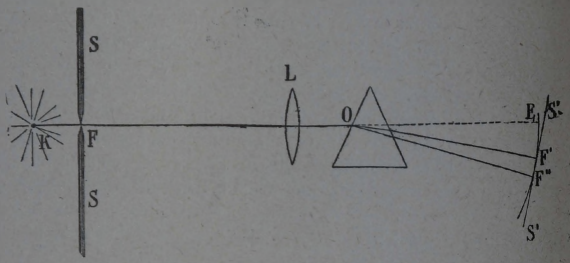


Fig. 188

in modo che l'immagine della fenditura F vada a formarsi in F' sullo schermo $S'S'$, il quale è stato disposto in modo da riuscire all'incirca tangente in F' ad un cerchio di centro O e di raggio OF_1.

Se la luce emanata da K è monocromatica, avremo una sola immagine della fenditura F; se invece contiene due radiazioni, avremo due immagini F', F''; ecc. In generale se le radiazioni che compongono la luce della sorgente sono in numero finito, avremo un numero limitato di righe luminose, al cui insieme si dà pure il nome di *spettro* della sorgente; se invece sono in numero infinito, e i loro periodi, e quindi anche i loro indici di rifrazione, variano con continuità, avremo una banda luminosa ininterrotta, che dicesi *spettro continuo*.

224 — Spettroscopio. — Quando si vuole uno spettro anche più puro si ricorre all'apparecchio detto *spettroscopio*.

La disposizione che di solito suol darsi a quest'istrumento è mostrata schematicamente nella figura 189. Un tubo FC, detto *collimatore*, è chiuso da una parte da un diaframma che porta la fenditura strettissima F, davanti a cui si pone la sorgente in esame, e dall'altra da una lente convergente C, nel cui piano focale si trova la fenditura.

Ogni punto di questa invia sulla lente C un fascio divergente, che si trasforma allora in un fascio parallelo, il quale va a battere su di un prisma P, portato da una piattaforma. I raggi emergenti dal prisma vengono poi a cadere sull' obbiettivo O di un cannocchiale.

Ora, tutti i raggi che hanno lo stesso periodo, e quindi lo stesso indice di rifrazione per la sostanza del prisma, subi-

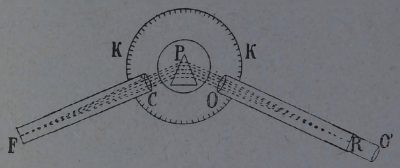


Fig. 189

scono in questo deviazioni uguali e sono ancora paralleli all' uscita dal prisma. L' obbiettivo del cannocchiale li fa perciò convergere nel suo piano focale, dove essi formano una immagine reale R della fenditura, del colore corrispondente al periodo loro.

L' insieme di tutte le immagini corrispondenti ai diversi periodi forma, nel piano focale dell' obbiettivo, uno spettro reale,

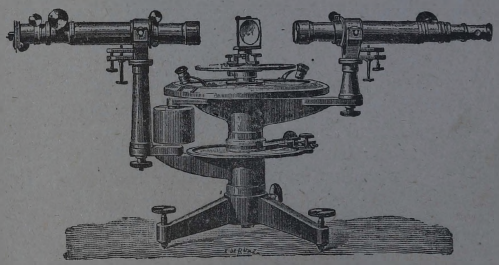


Fig. 190

analogo a quello che si aveva con la disposizione precedente; questo viene osservato mediante l' oculare O' del cannocchiale.

Cannocchiale e collimatore posson girare attorno all' asse di un cerchio graduato KK, trascinando sul lembo di questo due nonii che servono alle letture degli angoli di rotazione.

La figura 190 mostra uno spettroscopio completo. Le lunghezze del cannocchiale e del collimatore vengono aggiustate mediante cremagliere, e le letture del lembo graduato si effettuano con due piccoli microscopi.

225 — Proprietà calorifiche e chimiche delle radiazioni. — Per vedere in che modo il potere calorifico è distribuito lungo lo spettro, si può fare scorrere un termometro sensibilissimo sullo spettro solare, arrestandolo nelle varie regioni il tempo sufficiente perchè diventi stazionario. Si trova che, procedendo dal violetto verso il rosso, la temperatura si mantiene sensibilmente uguale a quella ambiente fino al giallo; da questo punto cresce fino un poco *al di là* del rosso, e ridiviene uguale alla temperatura ambiente solo ad una certa distanza dal rosso estremo.

Dunque il potere calorifico è quasi nullo dalle radiazioni più rifrangibili alle gialle, e crescente da queste alle rosse: e vi hanno radiazioni meno rifrangibili delle rosse, e quindi di lunghezza d'onda e di periodo maggiore, inefficaci sull'occhio, ma pure calorifiche. La regione dello spettro costituita da queste ultime radiazioni, viene detta *spettro infrarosso*.

Un altro modo di studiare le radiazioni dello spettro è basato sulla proprietà che esse possiedono d'impressionare le lastre fotografiche (come vedremo più tardi); così, se fotografiamo uno spettro, ricevendolo direttamente sopra una ordinaria lastra fotografica, troveremo che questa viene impressionata dal verde fino al violetto, ed anche in una regione posta al di là del violetto, estesa circa quanto lo spettro visibile, nella quale l'occhio non percepisce alcuna luminosità: questa regione dicesi *spettro ultravioletto*.

Ma un mezzo più comodo di rivelare le radiazioni ultraviolette è quello di usare uno schermo di carta (fig. 191), di cui una metà, N, sia lasciata inalterata, e l'altra, M, sia spalmata con polvere di platinocianuro di bario, sostanza che ha la proprietà di illuminarsi di una luce verdastra nei punti colpiti dalle radiazioni.

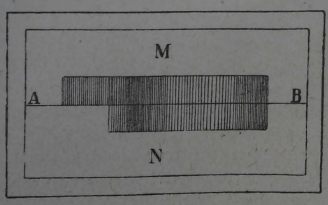


Fig. 191

Se si proietta lo spettro lungo la linea AB, in modo

che in parte cada nella regione *M* e in parte nella regione *N*, si osserverà sulla carta lo spettro ordinario della sorgente, e sul platinocianuro *M* una luminosità anche dove arrivano le radiazioni ultraviolette.

Spettri di emissione.

226 — L'esperienza insegna che, quando un corpo diviene luminoso, lo spettro della luce che esso emette è diverso a seconda della temperatura e dello stato fisico del corpo. Studiamo ora questi spettri, detti *di emissione*, per i varî corpi.

I solidi e i liquidi, allo stato di incandescenza, forniscono uno spettro perfettamente *continuo*, cioè senza interruzioni. Talvolta potrà bensì mancarne una parte, ad esempio l'estremo violetto o l'ultravioletto, ma la banda che costituisce lo spettro è sempre continua.

Sono spettri di questo genere, ad es., quello della fiamma a petrolio, o a gas, la cui luminosità è dovuta alle particelle di carbone portate all'incandescenza, quello delle reticelle Auer, quello dei filamenti delle lampadine elettriche, quello dei carboni dell'arco elettrico e quello dei metalli fusi, oltre la temperatura di 400-500 gradi circa.

Invece quando i corpi semplici divengono luminosi allo stato di vapore o di gas, come si verifica, ad es., allorchè un pezzetto di sodio viene posto nella fiamma di un becco Bunsen, o quando un gas viene attraversato da scariche elettriche, essi dànno sempre uno spettro a righe, o a fascie, luminose, separate da fascie oscure, e di colore eguale a quello che si ha nella posizione corrispondente di uno spettro continuo. Lo spettro allora vien detto *a righe* nel primo caso, *a bande* o *a colonnato*, nel secondo.

I vapori metallici forniscono di solito uno spettro a righe, l'azoto uno spettro a colonnato. La figura 192 mostra gli spettri del sodio (1), del potassio (2), dell'idrogeno (3), e dell'azoto (4).

Lo spettro a righe o a bande, o, come comunemente dicesi, lo spettro *discontinuo*, è caratteristico dello stato gassoso.

È molto importante il fatto che, quando la temperatura sia sufficientemente elevata, le righe dello spettro, cioè le radiazioni emesse ad una determinata temperatura, rimangono, entro limiti assai vasti, le stesse per ciascun elemento chimico.

In tal modo, dalle righe dello spettro di una sostanza gassosa, o portata allo stato di vapore, potremo riconoscere se in essa si trova, combinato o no, un dato elemento: potremo cioè fare l' analisi chimica qualitativa.

Questo processo, detto *analisi spettrale*, è sensibilissimo, perchè bastano traccie lievissime del corpo per farne comparire

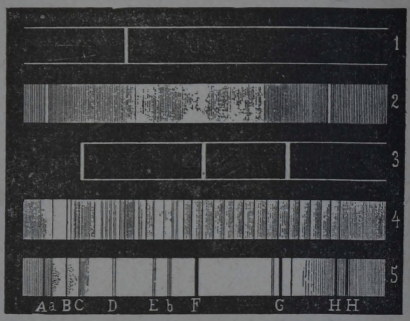


Fig. 192

lo spettro caratteristico; esso ha condotto alla scoperta di nuovi corpi semplici, tra cui il cesio, il rubidio, il tallio, ecc.

Spettro del sole.

227 — Uno spettro che merita considerazioue speciale è quello del sole. Lo si può osservare colla disposizione del § 223, oppure collo spettroscopio, illuminando la fenditura con la luce solare. Esso è uno spettro discontinuo, poichè è solcato da linee oscure trasversali, parallele alla fenditura, dette *linee*, o *righe*, *di Fraunhofer* dal nome del primo che le osservò, le quali indicano la mancanza delle corrispondenti radiazioni.

Le più notevoli si designano colle lettere dell' alfabeto *A, B, C,.... H* (fig. 193, *5*), le altre coi numeri delle lunghezze d' onda corrispondenti alla posizione da esse occupata nello spettro.

È importante notare che tali linee oscure corrispondono quasi sempre a lunghezze d' onda spettanti alle righe brillanti degli spettri d' emissione degli elementi. Così la linea *D*

corrisponde alla lunghezza d' onda 0,589 μ, che è appunto la lunghezza d' onda della linea gialla del sodio; e così pure molte linee dello spettro solare corrispondono a righe caratteristiche dello spettro del calcio e del ferro.

Uno spettro come questo del sole dicesi *di assorbimento;* e vedremo fra poco il perchè di questa denominazione.

228 — **Infrarosso e ultravioletto.** — Come la regione visibile dello spettro, così anche le regioni dell' infrarosso e dell' ultravioletto possono essere discontinue, cioè possono presentare delle porzioni in cui non si hanno radiazioni; e ciò si verifica, infatti, nello spettro del sole.

Per riconoscere ciò nell' ultravioletto basta eseguirne la fotografia, ricevendolo direttamente sulla lastra (§ 225). In questa, sviluppata, si vede una striscia nera, prodotta dalle radiazioni, solcata trasversalmente da righe, o bande, chiare, che indicano le radiazioni mancanti. Nelle fotografie dell' ultravioletto dello spettro solare si contano centinaia, ed anche migliaia, di righe.

Colla fotografia si può attualmente studiare anche lo spettro quasi completo, perchè si è riusciti a fabbricare delle lastre sensibili alla luce gialla, rossa, ed anche ad una parte dell' infrarosso.

Per lo studio dell' infrarosso, assai meglio del termometro comune, serve la *pila termoelettrica*, la quale è costituita da una serie di *coppie termoelettriche.*

Una coppia termoelettrica consiste di due fili sottili M, M' (fig. 193), di metalli diversi, congiunti fra loro con due saldature A, B, in modo da formare un circuito chiuso.

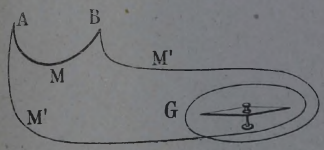


Fig. 193

Se le due saldature A e B vengono portate a temperatura diversa, mantenendo, per es., B alla temperatura dell' ambiente e riscaldando A con la mano, una corrente elettrica passa nel circuito $AM'BMA$; corrente che — come vedremo a suo tempo — è rivelata e misurata da uno speciale strumento G, detto *galvanometro.*

Riunendo varie coppie insieme, in modo che i fili di metallo diverso si alternino (fig. 194), si avrà un apparecchio, col

quale, lasciando tutte le saldature B a temperatura ordinaria e scaldando le saldature A, si otterranno indicazioni di differenze di temperatura anche lievissime. Per lo studio dello spettro tutte le saldature A vengono disposte lungo una sola linea retta RR, vicine fra loro.

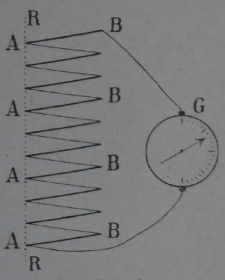


Fig. 194

Disponiamo la linea RR delle saldature A parallelamente alla fenditura, e spostiamola lungo lo spettro. Noteremo che la temperatura è maggiore o minore, a seconda della regione dello spettro in cui è situata la linea RR. Se lo spettro è discontinuo, le saldature A subiscono bruschi sbalzi di temperatura, che sono rivelati dal galvanometro G.

Con la pila termoelettrica si è riconosciuto discontinuità dello spettro solare nell' infrarosso, cioè bande *fredde* in esso; che le righe di Fraunhofer non hanno effetto calorifico, come non hanno effetto luminoso, nè chimico; e che anche nel violetto e in buona parte dell' ultravioletto vi è effetto calorifico, sebbene in misura assai piccola.

229 — Distribuzione dell' energia nello spettro solare. — L' esperienza ora descritta dimostra che ogni radiazione, visibile o no, trasporta con sè una certa quantità di energia, e

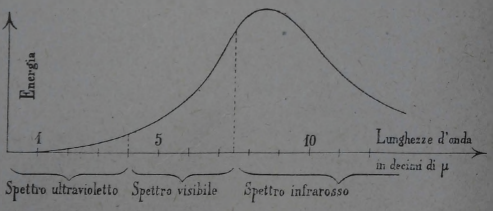


Fig. 195

che, mediante una pila termoelettrica, possiamo determinare com' essa sia distribuita nelle varie regioni dello spettro.

Per esempio, se spostiamo la pila termoelettrica lungo lo spettro del sole, e quindi riportiamo in un sistema di assi come

ascisse i valori delle lunghezze d' onda, e come ordinate quelli corrispondenti della energia trasportata da ogni radiazione, otteniamo una curva come quella della figura 195.

Trasmissione ed emissione.

230 — **Assorbimento delle radiazioni.** — Per indagare ora come venga variamente modificata l' energia dei raggi che si trasmettono in un mezzo, rischiariamo con un solido incandescente la fenditura di uno spettroscopio. Otterremo, come sappiamo, uno spettro continuo.

Ponendo sul cammino dei raggi una lastra di vetro colorato, o una vaschetta contenente un liquido colorato, lo spettro subisce notevoli modificazioni: l' intensità è in generale diminuita in tutto lo spettro, ma in certe regioni assai più notevolmente che in altre. Vale a dire che le radiazioni corrispondenti a queste regioni, nel passare attraverso la sostanza, sono state più assorbite che non le altre.

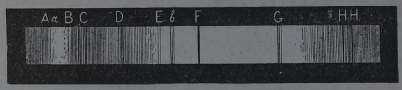


Fig. 196

Così, interponendo sul cammino dei raggi una soluzione di bicromato potassico, sparisce quasi tutto lo spettro, all' infuori della regione del giallo e del rosso; invece, con una soluzione di solfato di rame, scompare l' estremo rosso.

Gli spettri in tal guisa modificati si chiamano *spettri di assorbimento*. La figura 196 mostra lo spettro di assorbimento che si ottiene con un vetro di cobalto.

Un corpo può lasciar passare tutti i raggi visibili, e trattenere alcuni raggi invisibili, sia dell' infrarosso, sia dell' ultravioletto. Per esempio il vetro è trasparente per le radiazioni visibili, ma è opaco per le radiazioni che emettono i corpi a bassa temperatura e per le radiazioni ultraviolette. Per ciò si usa chiudere le serre con vetrate, che lasciano passare i raggi luminosi del sole, ma trattengono i raggi oscuri (infrarossi), emessi dai corpi in esse rinchiusi, e impediscono così il raffreddamento dell' ambiente.

Vi sono invece alcuni corpi assolutamente opachi per le radiazioni visibili, ma trasparentissimi per le radiazioni calorifiche invisibili, come avviene per una soluzione di iodio nel solfuro di carbonio, che è assolutamente opaca ai raggi visibili e trasparente all' infrarosso. Altri sono opachi soltanto pei raggi ultravioletti, come il solfuro di carbonio, od opachi quasi affatto solo per gli infrarossi, come il quarzo.

Infine vi hanno corpi che sono trasparenti per radiazioni di ogni lunghezza d' onda, come il salgemma.

231 — Colore dei corpi. — L' assorbimento delle radiazioni ci dà facile spiegazione dei colori che i corpi presentano *per trasparenza*. Quando un corpo lascia passare completamente, o nella stessa proporzione, tutte le radiazioni, è *incoloro;* altrimenti è colorato, di quel colore che risulta dalla sovrapposizione delle radiazioni trasmesse. Così, ad es., il vetro turchino di cobalto lascia passare, oltre il turchino e parte del violetto, anche il verde e parte del rosso (fig. 196).

I colori dei corpi opachi (colori *per riflessione*) hanno una spiegazione analoga. Soltanto in tal caso la selezione delle radiazioni, invece che per trasmissione, si fa per diffusione; e il colore è dato allora dalle radiazioni diffuse. Così se un corpo opaco è rosso, vuol dire che assorbe tutti i raggi all' infuori dei rossi, o che questi sono i raggi che diffonde in maggior proporzione.

Lo spettro di assorbimento, e perciò anche il colore dei corpi, può variare notevolmente colla temperatura. Ad es., certi corpi rossi diventano verdi quando siano riscaldati, e riprendono il color rosso alla temperatura ordinaria.

232 — Potere assorbente e potere emissivo. — Deriva da quel che abbiamo detto che l' assorbimento di un fascio di raggi, da parte di un corpo, dipende dalla natura di questo e dalla lunghezza d' onda dei raggi. Oltre a ciò la quantità di energia raggiante assorbita dipende anche dalla temperatura del corpo, dalle condizioni fisiche della sua superficie, e dalla inclinazione su essa dei raggi.

Sia M (fig. 197) un corpo mantenuto alla temperatura θ; C un fascio di raggi paralleli di lunghezza d' onda λ, I l' intensità del fascio, cioè la quantità di energia portata in un secondo ed espressa in *erg* (Vol. I, § 135).

Parte del fascio sarà riflessa, parte trasmessa e parte diffusa; la parte rimanente sarà assorbita.

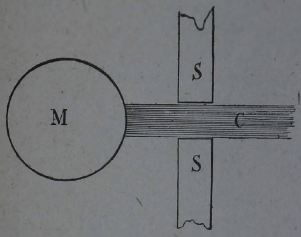


Fig. 197

Chiamando A l'intensità della parte assorbita, il rapporto $\frac{A}{I} = a$ dicesi *potere assorbente* di quel corpo in quel fascio, per la lunghezza d'onda λ e per la temperatura θ.

Se il corpo non riflette, non diffonde e non trasmette affatto radiazioni di lunghezza d'onda λ, esso dicesi *perfettamente assorbente* per queste radiazioni.

Quando poi un corpo è capace di assorbire totalmente radiazioni di ogni lunghezza d'onda, dicesi *perfettamente nero*.

Il corpo M, capace di assorbire le radiazioni λ alla temperatura θ, può emettere in generale queste stesse radiazioni alla medesima temperatura. Allora l'intensità del fascio di raggi di lunghezza d'onda λ, inviato da M nel cilindro C, è, per definizione, il *potere emissivo* del corpo in quel cilindro, per la temperatura θ e per la lunghezza λ. Esso si designa colla lettera e, si esprime in unità meccaniche, e dipende dalla natura del corpo, dalle condizioni fisiche della sua superficie, e dalla inclinazione dei raggi rispetto ad essa.

233 — Legge di Kirchhoff. — Tra il potere assorbente e il potere emissivo ad una stessa temperatura, ora definiti, esiste una relazione importante, detta *legge di Kirchhoff*, che noi ci limiteremo ad enunciare. Essa è la seguente:

Ad una data temperatura, il rapporto fra il potere emissivo ed il potere assorbente per una data lunghezza d'onda, è il medesimo per ogni corpo. Ossia

$$\frac{e}{a} = \text{costante}. \qquad (15)$$

Un corpo solido o liquido assorbe, ad una data temperatura, le radiazioni che, a questa temperatura, è capace di emettere.

Foucault, per primo, dimostrò sperimentalmente questa proprietà anche per i vapori incandescenti. Ciò si può vedere nel modo seguente.

Illuminiamo, mediante un arco elettrico *A* (fig. 198), la fenditura *F*, dietro la quale si trova la lente *L* e il prisma *P*, disposti in modo da ottenere su di uno schermo (§ 223) uno spettro puro *VR* della punta di uno dei carboni dell'arco, spettro che sarà continuo (§ 226).

Fra l'arco e la fenditura interponiamo quindi una lampada Bunsen *B*, e collochiamo nella sua fiamma non luminosa un

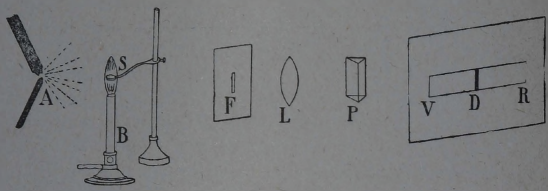


Fig. 198

pezzetto di sodio, portato da un apposito scodellino *S*. Il sodio allora manda vapori, che subito si incendiano, e contemporaneamente si vede comparire, sul fondo brillante dello spettro, una riga nera nella posizione della riga brillante del sodio.

Possiamo assicurarci che la posizione è proprio quella, spegnendo l'arco elettrico: al posto della linea oscura vediamo comparire una riga gialla.

Ecco come si spiega questo fenomeno, detto dell'*inversione dello spettro*.

Le radiazioni emesse dall'arco traversano il vapore di sodio, e la radiazione *D*, che fra esse si trova, è quasi completamente assorbita. Il vapore di sodio la emette a sua volta, ma — a causa della più bassa temperatura del becco Bunsen — con intensità molto minore. In corrispondenza della riga *D* lo schermo sarà dunque meno illuminato che nelle parti contigue e apparirà oscuro per contrasto.

Da questa esperienza si trae la spiegazione delle righe nere dello spettro solare.

Si può infatti ritenere che il sole sia un corpo, solido o liquido, incandescente, circondato da un'atmosfera gassosa, essa pure incandescente. Il nucleo solido o liquido emette uno spettro continuo, e l'involucro gassoso, uno spettro di righe corrispondenti agli elementi di cui è costituita l'atmosfera solare. Ma la temperatura di questa è inferiore a quella del nucleo, e quindi, poichè le radiazioni assorbite non saranno compensate

in intensità dalle corrispondenti radiazioni emesse, vi saranno nello spettro delle righe oscure.

Si è già detto (§ 227) che esse corrispondono esattamente alle stesse lunghezze d'onda delle righe degli elementi da noi conosciuti: siamo quindi indotti a concludere che questi corpi esistono, allo stato di vapore, anche nell'atmosfera del sole.

Una conferma di questa teoria si ha nel fatto che se, durante un ecclisse, si dirige la fenditura di uno spettroscopio tangente al lembo dell'immagine del sole, appaiono nello spettro righe brillanti là dove prima erano righe oscure.

Fotografia.

234 — Prove negative. — La fotografia ha per iscopo di ottenere, per mezzo di opportuni procedimenti fisici e chimici, immagini permanenti degli oggetti.

Il comune procedimento è fondato sul fatto che alcuni sali di argento, e specialmente il bromuro, incorporati in determinate sostanze organiche, come la gelatina per esempio, esposti all'azione della luce, subiscono un' alterazione tale, che li rende decomponibili da certe soluzioni riduttrici.

Ecco come si procede. Si prende una *lastra fotografica*, ossia una lastra di vetro su cui è stato disteso uno strato di gelatina, contenente minuti granuli di bromuro d'argento; e si espone, per breve tempo, in una camera oscura là dove si forma l'immagine netta dell'oggetto da fotografare.

Nelle regioni colpite dalla luce si origina una alterazione chimica, per la quale esse, quando poi sieno messe a contatto con una opportuna soluzione riduttrice (*sviluppo*), si anneriscono più o meno nelle varie parti della lastra, a seconda dell'intensità e qualità della luce che le ha colpite. Tale annerimento è dovuto alla formazione di una polvere tenuissima di argento, che si libera dal bromuro.

Le regioni non colpite dalla luce rimangono invece inalterate. Si ha così dell'oggetto un'immagine *negativa*, vale a dire coi chiari e gli scuri invertiti.

Immergendo poi la negativa in una soluzione di iposolfito di sodio, il bromuro non ancora ridotto viene disciolto, e non rimane sul vetro che uno strato di gelatina e di argento inalterabile: l'immagine allora è, come si dice, *fissata*.

La negativa infine vien lavata e posta ad asciugare.

235 — Prove positive. — Prendiamo un foglio di carta, su cui sia disteso uno strato sensibile simile a quello delle lastre, e, dopo averlo collocato sotto alla negativa in modo che le due superficie coperte di gelatina siano in contatto, esponiamolo un poco alla luce: otterremo, dopo lo sviluppo, una immagine invertita della negativa, ossia un' immagine *positiva* dell' oggetto, che si rende inalterabile, ossia si fissa, come la negativa.

È ovvio che le lastre e carte sensibili devono essere maneggiate nel buio, o alla luce rossa (alla quale non sono, in generale, alterabili), finchè non siano completamente fissate.

Comunemente si ricorre, per fare le positive, cioè, come si dice, per la *stampa* delle fotografie, a carte al cloruro o al citrato di argento anzichè a quelle al bromuro. In tal caso l' annerimento, nei punti colpiti dalla luce, avviene da sè senza bisogno di sviluppo, ma è molto più lento; cosicchè queste carte hanno il vantaggio di poter essere sorvegliate durante la stampa e di non richiedere le manipolazioni nell' oscurità.

Basta poi fissare e lavare, per aver finita la positiva.

236 — Macchina fotografica. — Le immagini da ricever sulle lastre sensibili si ottengono mediante le *macchine fotografiche*.

Una delle più comuni è rappresentata dalla figura 199. Essa consiste in una intelaiatura di legno, che porta nella parte anteriore un sistema di lenti (*obbiettivo*), destinato a formare le immagini; e nella parte posteriore un telaietto al quale si può adattare un vetro colla faccia rivolta all' obbiettivo smerigliata, o un astuccio a perfetta chiusura di luce (*châssis*), contenente la lastra fotografica. Queste due parti della macchina sono congiunte da un soffietto di pelle, aperto solo agli estremi, di lunghezza variabile.

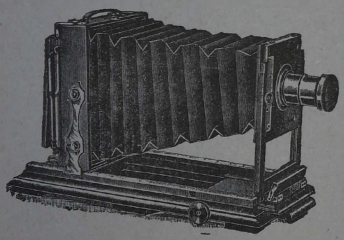


Fig. 199

Le cose sono disposte in modo che, quando si toglie il vetro smerigliato e si sostituisce coll' astuccio, la lastra in esso

contenuta occupa col suo strato sensibile la stessa posizione che occupava la faccia smerigliata del vetro.

Ebbene, quando, allungando o accorciando il soffietto, si è *messo a fuoco*, cioè si vede l' immagine dell' oggetto disegnarsi netta sul vetro smerigliato, si pone al suo posto la lastra, e si apre, per un tempo brevissimo, l' *otturatore* dell' obbiettivo. L' impressione della lastra è avvenuta: non resta che eseguire le manipolazioni chimiche indicate (§ 234).

237 — Fotografia a colori — Da alcuni anni si è riusciti ad ottenere nelle fotografie anche la riproduzione dei colori.

Uno dei procedimenti è fondato sulla proprietà che ha l' occhio di dare la sensazione di un colore qualunque, fondendo insieme le tre diverse sensazioni — opportunamente intense — prodotte da tre colori fondamentali (§ 222).

Si fanno perciò tre fotografie dell' oggetto: una attraverso una sostanza che lasci passare solo i raggi rosso-aranciati, un' altra attraverso un filtro analogo pei raggi verdi, e la terza attraverso un filtro pei raggi violetti.

Le lastre verranno impressionate, la prima soltanto nei punti colpiti da raggi rosso-aranciati, la seconda solamente in quelli su cui cadono raggi verdi, e la terza solo nei punti in cui arrivano raggi violetti.

Da queste tre negative — con procedimento di stampa speciale — si fanno tre positive distinte, una rosso-aranciata, una verde e una violetta; poi, con tre apparecchi di proiezione (§ 207) si producono le immagini di tutte e tre le positive su di un medesimo schermo, sovrapponendole esattamente. Si vede allora sullo schermo l' immagine dell' oggetto coi colori naturali.

I colori sono alquanto sbiaditi e non tutte le gradazioni vengono ben riprodotte.

238 — Processo Lumière. — I fratelli Lumière sono giunti recentemente ad ottenere la fotografia a colori mediante una sola posa, basandosi sulla seguente proprietà dell' occhio.

Per avere la sensazione di un dato colore, non è necessario fondere in *uno solo* i tre colori fondamentali nelle dovute proporzioni: l' occhio riceve la medesima impressione disponendo invece *vicini* l'uno all'altro minutissimi corpicciuoli, colorati coi colori fondamentali, in quelle determinate proporzioni. Ecco allora in che consiste il processo Lumière.

Su di una lastra di vetro si distende uno strato di granuli di fecola (di patate) colorati coi tre colori fondamentali — rosso-aranciato, verde e violetto — in tali proporzioni da ottenere la sensazione del bianco. Se l' operazione è ben fatta, la lastra, osservata per trasparenza, apparisce quasi incolora o leggermente grigiastra.

Sulla fecola si distende poi uno strato di gelatina con bromuro di argento, reso sensibile a tutti i colori; e si fa con questa lastra la fotografia dell' oggetto nel modo ordinario, volgendo però verso l' obbiettivo la faccia non portante lo strato sensibile.

Allora, se un raggio di luce, supponiamo violetta, colpisce un granello violetto, lo attraversa e impressiona lo strato sensibile di bromuro di argento in corrispondenza del granello. Se invece che da un raggio violetto, il granello è colpito da un raggio di colore diverso, questo viene assorbito e il bromuro di argento sottostante non è impressionato. Analogamente succede per le altre due specie di granuli.

Sviluppando allora la lastra, e guardandola per trasparenza, non potremo vedere i granelli violetti dove è caduta la luce violetta, nè i rossi nelle parti rosse dell' immagine, ecc. La lastra ci apparirà quindi una negativa, colorata coi colori complementari (§ 222) di quelli dell' oggetto riprodotto.

Per avere i veri colori, la lastra viene *invertita*; cioè, prima di fissarla, la si tratta con un ossidante, che sciolga l' argento metallico nei punti nei quali si è depositato, e non alteri il bromuro che lo sviluppo non ha ridotto. Tolto infatti così l' argento metallico, se ora si sviluppa la lastra in piena luce, il bromuro rimasto annerisce per la liberazione dell' argento, e compare l' immagine positiva. Questa volta l' annerimento si forma sotto i dischetti di fecola che in principio non erano stati attraversati dalla luce; e quindi la lastra, guardata per trasparenza, mostra ora i colori naturali dell' oggetto.

ELETTRICITÀ

Lo stato elettrico.

239 — **Fenomeni elettrici.** — Una bacchetta di ebanite o di ceralacca, quando venga strofinata con un pezzo di flanella, acquista particolari proprietà, che non possedeva prima dello strofinamento. Essa attrae dei corpiccioli leggieri: per esempio, dei piccoli pezzi di carta, di sottile foglia metallica, ecc. Una bacchetta di vetro acquista essa pure la stessa proprietà per lo strofinamento.

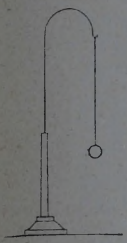


Fig. 200

Noi diremo che il vetro, l'ebanite, la ceralacca — in tal caso — hanno assunto lo *stato elettrico* o sono *carichi di elettricità*.

Così ad es., quando un corpo, avvicinato a una pallina di sughero dorata, sospesa a un filo (fig. 200), la attira, diremo che è *elettrizzato*. La pallina sospesa, che provvisoriamente ci servirà per rivelare lo stato elettrico, si chiama *pendolino elettrico*.

240 — **Stato elettrico vitreo e resinoso.** — Se consideriamo i fenomeni a cui danno origine una bacchetta di vetro ed una di ebanite, strofinate con lo stesso panno, troviamo che lo stato elettrico dell'ebanite è diverso da quello del vetro.

Prendiamo, infatti, una sottile bacchetta di ebanite elettrizzata e sospendiamola orizzontalmente in modo che sia mobile intorno a un asse verticale (fig. 201); poi avviciniamo all'estremità di questa bacchetta un bastone di vetro pure elettrizzato: vedremo che l'ebanite sospesa è *attratta*. Se le avviciniamo

invece un bastone di ebanite elettrizzato, troveremo che la bacchetta sospesa è *respinta*.

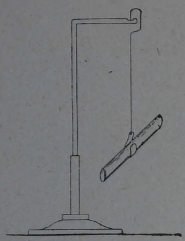


Fig. 201

Avremmo potuto sospendere una bacchetta di vetro elettrizzata, invece di quella d'ebanite. Il risultato sarebbe stato opposto a quello precedente: il vetro elettrizzato avrebbe respinta la bacchetta, il bastone di ebanite l'avrebbe attratta.

Dobbiamo concludere che lo stato elettrico del vetro *non è identico* a quello dell'ebanite. Daremo quindi al primo il nome di *stato elettrico vitreo*, e al secondo il nome di *stato elettrico resinoso*, essendo esso uguale allo stato elettrico che assumono in generale le resine quando vengano strofinate.

L'esperienza inoltre dimostra che lo stato elettrico posseduto da un corpo ha sempre le proprietà di quello vitreo o di quello resinoso.

I risultati che abbiamo trovato, possono essere così enunciati: *corpi aventi stato elettrico uguale od omonimo si respingono, corpi aventi stato elettrico contrario od eteronimo si attraggono.*

Conduttori e coibenti.

241 — Lo stato elettrico si può trasmettere da un corpo ad un altro. Per mettere ciò in evidenza, prendiamo un cilindro metallico *AB* (fig. 202), sospeso orizzontalmente mediante due fili di seta, e tocchiamolo con un bastone di ebanite elettrizzato. Avvicinando allora al cilindro un' asticella di ebanite elettrizzata, sospesa come nell' esperienza precedente, vedremo che è respinta: dunque il cilindro ha acquistato lo stato elettrico resinoso.

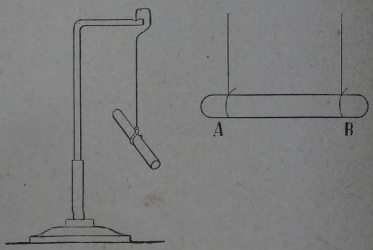


Fig. 202

Diremo quindi che dall'ebanite lo stato elettrico si è trasmesso al cilindro.

Osserviamo poi che l'estremità *A* del cilindro respinge l'asticella, anche se il contatto fra il cilindro e il bastone di ebanite è avvenuto all'estremità opposta *B*. Dunque lo stato elettrico dell'ebanite, non soltanto si comunica al cilindro metallico, ma in esso passa senz'altro da una regione all'altra.

Questo comportamento del metallo è assai diverso da quello presentato dall'ebanite o dal vetro. Una bacchetta di ebanite o di vetro, infatti, dotata di stato elettrico ad una estremità, non si mostra elettrizzata all'altra estremità.

Abbiamo dunque due categorie di corpi: gli uni propagano facilmente lo stato elettrico fra le loro varie parti: gli altri, invece, mantengono localizzato lo stato elettrico nella regione in cui questo è stato destato o comunicato.

I primi si chiamano *conduttori*, gli altri *coibenti*.

242 — **Conduttori in comunicazione con la terra.** — Ne segue evidentemente, che quando un corpo elettrizzato viene in contatto con un conduttore, entrambi i corpi si manifestano carichi di elettricità. Se invece il corpo elettrizzato è posto in contatto con la terra — o direttamente o coll'intermediario di un conduttore — il suo stato elettrico scompare, cioè il corpo torna allo *stato naturale* o *neutro*, o anche, come suol dirsi, *si scarica*.

Perciò, quando si vuole scaricare un corpo, basta *metterlo a terra*, ossia porlo in comunicazione col suolo. Per dimostrarlo, prendiamo una sferetta metallica appesa ad un filo di seta; e, dopo averla toccata con una bacchetta di ebanite precedentemente strofinata, verifichiamo che essa è elettrizzata, avvicinandola al pendolino. Tocchiamo allora con un dito la sferetta (ponendola così, attraverso il nostro corpo, che è conduttore, in comunicazione col suolo): essa dopo non è più capace di attrarre il pendolino, e quindi si è scaricata.

243 — **Isolatori.** — Se si vuole adunque che un corpo conduttore conservi il suo stato elettrico, è necessario reggerlo mediante pezzi di materia coibente ben difesi dalla polvere e dall'umidità, che li renderebbero conduttori. Per tale ufficio i corpi coibenti sono detti anche *isolanti*.

Buoni materiali isolanti sono la seta, lo zolfo, la ceralacca, la paraffina: quando però occorrono degli isolanti rigidi o più

robusti, si ricorre all'ambra, all'ebanite, al vetro. Quest'ultimo però è poco adatto, perchè, nell'aria non secca, si ricopre facilmente di uno straterello di umidità, che lo rende ben presto conduttore. Si ovvia comunemente a questo inconveniente coprendo il vetro di uno strato di ceralacca, gommalacca, o paraffina; ma assai meglio usando un *isolatore di Mascart* (fig. 203), costituito da una bottiglia di vetro, sul fondo della quale è saldata una colonna, pure di vetro, destinata a reggere — sopra un piatto, se occorre — il corpo che si vuol isolare. La bottiglia contiene acido solforico che, assorbendo nell'interno l'umidità, mentiene asciuttissima la colonna di vetro: basta cambiare di tanto in tanto l'acido, perchè l'isolamento sia buonissimo.

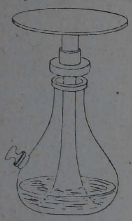


Fig. 203

244 — Tutti i corpi si elettrizzano per strofinio. — Dalla proprietà che hanno i corpi conduttori, di scaricarsi quando sono in comunicazione col suolo, deriva che un bastone metallico, strofinato mentre vien tenuto in mano, non può mostrarsi elettrizzato, poichè, attraverso al nostro corpo, esso è costantemente in comunicazione con la terra.

L'elettrizzamento si ottiene, invece, quando il conduttore venga tenuto con un manico isolante: una sfera metallica, per esempio, sostenuta da un piede di vetro, si elettrizza quando venga battuta con una pelle di volpe.

Collo strofinamento, dunque, *tutti i corpi si elettrizzano.*

Da questa legge si inferisce che, quando si strofinano insieme due corpi, si elettrizzano entrambi: l'esperienza conferma questa deduzione e mostra inoltre, come vedremo più innanzi (§ 254), che i due corpi assumono stati elettrici contrarî.

Elettroscopi.

245 — Polveri elettroscopiche. — Un metodo per riconoscere se un corpo sia elettrizzato e in che stato elettrico si trovi è quello delle cosidette *polveri elettroscopiche.*

La più usata di esse è costituita da un miscuglio di minio e zolfo, finamente polverizzati. Se facciamo passare attraverso ad un velo questo miscuglio, i granellini delle due polveri,

confricandosi tra di loro e col velo, si elettrizzano: la polvere di minio acquista lo stato elettrico vitreo, quella di zolfo, invece, il resinoso.

Soffiando perciò su di un corpo la polvere elettroscopica attraverso un velo, mediante un comune soffietto, il corpo si ricoprirà di zolfo o di minio, secondochè attrae l'uno o l'altro di essi, ossia secondochè il suo stato elettrico è vitreo o resinoso; e non ne attrarrà alcuno di preferenza se non è elettrizzato.

246 — **Elettroscopio a foglie.** — Per riconoscere se un corpo sia elettrizzato o no, si suole più spesso mettere in comunicazione il corpo con un sistema costituito di due striscioline conduttrici e leggiere (fig. 204), sospese all'estremità inferiore di un'asticella metallica isolata. Striscie di carta velina, di foglia d'oro o d'alluminio, servono benissimo allo scopo.

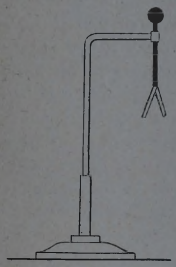


Fig. 204

Se il corpo è elettrizzato, esso comunica per conduzione il proprio stato elettrico alle foglie, che per conseguenza si respingono. Così lo stato elettrico del corpo è rivelato dalla divergenza delle due foglie.

Un apparecchio siffatto si chiama *elettroscopio*.

Adesso, invece di due foglie, se ne mette frequentemente una sola, addossata a una lastrina verticale metallica isolata, e a questa attaccata per l'estremità superiore (fig. 205).

Ordinariamente poi gli elettroscopi sono racchiusi dentro recipienti di vetro (fig. 206); e ciò pel duplice scopo di mantenerli in un ambiente secco, e di evitare che, per le correnti d'aria, le foglioline si agitino e si rompano.

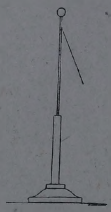


Fig. 205

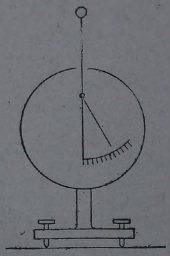


Fig. 206

247 — **Elettrometro a quadranti.** — Un altro apparecchio, che si presta molto bene per riconoscere se un corpo è elettrizzato, e in quale dei due stati elettrici si trovi, e alle

misure ad essi relative (§ 261), è l'*elettrometro a quadranti*. È costituito da quattro quadranti metallici portati da sostegni isolanti (fig. 207) e disposti in un piano orizzontale: i quadranti opposti 1 e 4 comunicano tra loro mediante un filo di rame, così pure i quadranti 2 e 3; e al disopra di essi è sospesa a piccola distanza, mediante un sottile filo di platino, una leggiera lamina di alluminio, detta impropriamente *ago*, alla quale vien data la forma di 8 indicata nella figura. Essa è libera di ruotare in un piano parellelo ai quadranti.

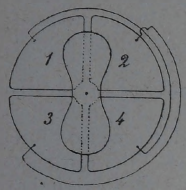


Fig. 207

Carichiamo l'ago con una bacchetta di ebanite, poniamo una coppia di quadranti in comunicazione col suolo, e l'altra coppia in comunicazione col corpo che si vuole esaminare: l'ago si muoverà (§ 240) verso una o l'altra coppia di quadranti, secondo che il corpo sarà nell'uno o nell'altro stato elettrico, e rimarrà però immobile se il corpo è allo stato neutro.

Per potere osservare deviazioni dell'ago anche piccolissime, vi si unisce rigidamente un leggero specchietto S (fig. 208), su cui si fa cadere la luce di una lampada L; e di questa si raccoglie l'immagine L_1, formata da una lente convergente O, su di una scala graduata AB.

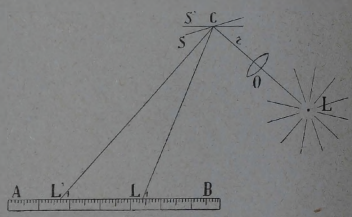


Fig. 208

Quando lo specchietto, ruotando, assume una nuova posizione S', l'immagine della lampada corre lungo la scala, e si ferma in L'_1. Siccome l'angolo $L_1\ C\ L'_1$, è doppio (§ 159) di quello di cui ha ruotato lo specchio e quindi l'ago, e lo spostamento $L_1\ L'_1$ è tanto maggiore quanto più grande è la distanza della scala dallo specchio, si potranno così riconoscere e misurare rotazioni dell'ago anche piccolissime.

Un elettrometro a quadranti può esser messo in condizioni tali da risultare molto più sensibile di un elettroscopio a foglie, poichè occorre assai minor forza a torcere un sottilissimo e lungo filo, che a sollevare e flettere una foglia, per quanto sottile essa possa essere.

Fenomeno di influenza.

248 — L'elettrizzamento di un conduttore si può produrre, oltre che per strofinamento, o per mezzo della comunicazione metallica con un altro corpo elettrizzato, anche *avvicinando* semplicemente ad esso un altro corpo in istato elettrico.

Prendiamo infatti un cilindro metallico, disposto orizzontale sopra un sostegno isolante (fig. 209), e attacchiamo ai due estremi e nel mezzo di esso, tre elettroscopi *A*, *B*, *C*, costituiti semplicemente da coppie di foglie d'oro. Avvicinando al cilindro un bastone di ebanite *M*, prima strofinato, vedremo subito divergere le foglie degli elettroscopi estremi, mentre restano chiuse quelle dell'elettroscopio del centro. La divergenza delle foglie aumenta, sino a un certo limite, coll'avvicinamento di *M*.

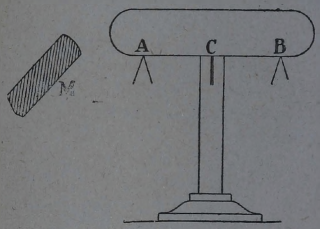


Fig. 209

Allontanando poi il bastone, vedremo richiudersi man mano le foglioline, fino a ritornare nella posizione verticale.

Se infine, ripetendo l'esperienza senza allontare l'ebanite *M*, soffiamo sul conduttore la polvere elettroscopica indicata (§ 245), vedremo che esso si ricopre di zolfo nella parte vicina al bastone di ebanite e di minio nella parte opposta, e che la parte centrale non attrae di preferenza alcuna delle due sostanze.

Possiamo dire dunque che, avvicinando un corpo carico di elettricità ad un conduttore isolato, si destano in questo i due stati elettrici, e che precisamente, *in vicinanza del corpo carico si desta uno stato elettrico di nome contrario a quello del corpo stesso, in lontananza, uno stato elettrico di nome uguale, e rimane nel mezzo una zona neutra. Allontanando il corpo carico, il conduttore isolato perde ogni segno di elettrizzamento.*

L'elettrizzamento così ottenuto del conduttore isolato dicesi *per influenza* o *per induzione:* il corpo *M* si chiama *influenzante* o *inducente,* il conduttore che si carica, *indotto.*

In conseguenza di tale fenomeno, facendo comunicare col suolo un conduttore soggetto all'influenza di un corpo eletrizzato, esso assumerà in ogni suo punto uno stato elettrico

opposto a quello del corpo influenzante: infatti, in tale condizione, il conduttore e la terra formano un unico sistema indotto, e la zona neutra si troverà quindi a distanza grandissima.

249 — **Schermi elettrici.** — Un conduttore isolato può essere tuttavia sottratto all'inflenza dei corpi elettrizzati circostanti.

Basta, per ciò, collocarlo entro un inviluppo conduttore chiuso, il quale può anche essere una gabbia di rete metallica.

Infatti, collochiamo un elettroscopio entro un cilindro fatto con rete metallica (fig. 210), tenendolo isolato da questa. Avvicinando allora al cilindro un corpo elettrizzato qualunque, non osserveremo alcun movimento nelle foglie dell'elettroscopio, mentre invece alcune foglioline attaccate esternamente alla rete, mostreranno chiaramente che questa è elettrizzata. Dunque:

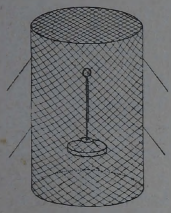


Fig. 210

Un inviluppo conduttore forma uno schermo elettrico perfetto.

Possiamo anche far comunicare il cilindro col corpo elettrizzato, senza che gli elettroscopi più sensibili interni rivelino alcun indizio di elettrizzamento.

Il Faraday per primo riconobbe che un involucro conduttore protegge i corpi interni dalle influenze elettriche di quelli esterni; e perciò il cilindro di rete metallica, che ci ha servito poc'anzi, prende il nome di *gabbia di Faraday*.

Come vedremo in seguito (§ 256), le foglie dell'elettroscopio rimangono chiuse, anche se comunicano coll'involucro.

Pila.

250 — L'elettrizzamento di un conduttore, oltre che nei modi già indicati, può ottenersi anche con la *pila*.

Si chiama pila, o, più propriamente, *elemento di pila*, un apparecchio costituito da due pezzi *AB* (fig. 211) di metallo o di altro solido conduttore — di natura diversa fra loro — immersi in una soluzione acquosa di un acido, di una base, o di un sale.

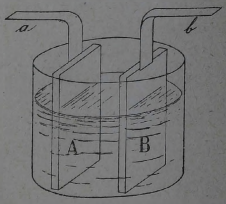


Fig. 211

I due conduttori si chiamano *elettrodi*: ad essi sono saldate due striscie metalliche *a*, *b*, che diconsi i *poli* dell'elemento di pila.

Mettiamo in comunicazione — per mezzo di fili metallici — i due poli di un elemento di pila rispettivamente con due lastre metalliche isolate *m*, *n* (fig. 212): troveremo che le due lastre risultano ambedue elettrizzate, e che l'una presenta lo stato elettrico vitreo, l'altra quello resinoso. Ciò potrà riconoscersi congiungendo metallicamente l'una e l'altra lastra successivamente ad una coppia di quadranti di un elettrometro (§ 247), l'altra coppia del quale sia messa in comunicazione colla terra, e il cui ago sia stato caricato con una bacchetta di ebanite.

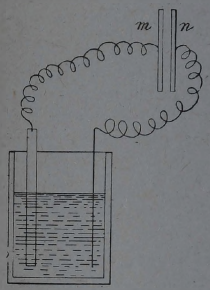


Fig. 212

Se poi congiungiamo diversi elementi di pila fra loro, in modo che il polo vitreo di un elemento sia congiunto col polo resinoso del successivo — cioè costituiamo una pila propriamente detta — e ripetiamo l'esperienza precedente servendoci dei poli estremi liberi, troveremo che la deviazione dell'elettrometro sarà molto maggiore di prima, e tanto maggiore quanto più grande è il numero degli elementi.

Usando una pila di circa 400 elementi, l'elettrizzamento delle lastre sarà così forte, da poter esser messo in evidenza con un semplice elettroscopio a foglie.

Gli elementi di pila comunemente adoperati sono svariatissimi. Il primo di essi è l'*elemento voltaico*, costituito di due lastre, una di rame e l'altra di zinco, immerse in un vaso contenente acqua acidulata con acido solforico. Il polo congiunto alla lastra di rame presenta lo stato elettrico vitreo, quello congiunto allo zinco lo stato elettrico resinoso.

Oltre alle pile indicate, si usano, specialmente per caricare gli elettroscopi, le *pile a secco*. La più nota tra queste è la *pila Zamboni* (fig. 213), costituita da un gran numero di dischi di carta, stagnati sopra una faccia, spalmati di biossido di manganese sull'altra. Essi sono sovrapposti in modo che le faccie di una specie sieno rivolte tutte dalla stessa parte; la colonna così formata è attraversata da una bacchetta di

sostanza isolante, ad es. di ebanite, destinata a mantenere i dischi al loro posto. Essi son poi tenuti ben aderenti fra loro

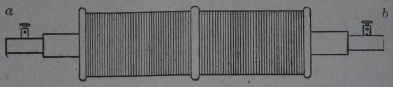


Fig. 213

dalla pressione di due lastrine circolari d'ottone poste agli estremi, le quali pongono il primo e l'ultimo disco in comunicazione coi *serrafili a* e *b*.

Quantità di elettricità.

251 — **Cilindro di Faraday.** — Un comportamento caratteristico dello stato elettrico si può rivelare introducendo un corpo elettrizzato dentro un recipiente metallico di forma qualunque, isolato da terra. Se per mezzo di un filo metallico si congiunge quest' ultimo all' elettroscopio, si trova che la deviazione delle foglioline è del tutto indipendente dalla posizione che occupa il corpo elettrizzato dentro il recipiente e dalle sostanze che riempiono questo.

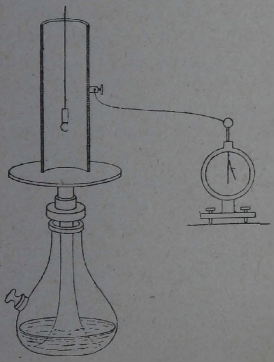


Fig. 214

Tale importantissimo fatto lo mostreremo comodamente per mezzo di un cilindro cavo di metallo (fig. 214), nel cui coperchio è praticata un' apertura dalla quale s' introduce il corpo elettrizzato. Questo semplice apparecchio, dalla sua forma e dal nome di chi ne ha riconosciuto le proprietà, si chiama *cilindro di Faraday*.

Isoliamolo anzitutto da terra, per mezzo di un isolatore Mascart (§ 243) o di un pezzo di paraffina, e poniamolo in comunicazione con un elettroscopio mediante un filo metallico.

Per l' apertura superiore del cilindro, introduciamo allora una piccola sfera di ottone, attaccata, con un pezzetto di paraffina, ad una lunga e sottile bacchetta di vetro.

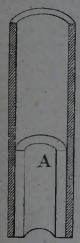


Fig. 215

Se la pallina è elettrizzata, vedremo subito la foglia dell' elettroscopio assumere una deviazione, che resterà costante comunque si sposti la pallina nell' interno, ed anche se la si porta a contatto col fondo o colle pareti del cilindro. Si trova inoltre che la deviazione rimane pure inalterata se tra la pallina e la parete del cilindro si interpone una sostanza diversa dall' aria, come ad esempio un anello A di paraffina (fig. 215).

Se introduciamo nel cilindro un' altra pallina, pure elettrizzata, vedremo l' elettroscopio assumere una deviazione ancora costante, ma diversa — in generale — dalla prima.

252 — Quantità di elettricità. — L' esperimento ora descritto ci permette di definire esattamente e misurare le quantità di elettricità possedute dai corpi elettrizzati.

Supponiamo infatti di avere prima di tutto parecchi corpi $A_1, A_2, \ldots A^n$, carichi di elettricità della stessa specie, e tali che introdotti successivamente nel cilindro di Faraday producano uguali deviazioni nell' elettroscopio ad esso congiunto: per definizione diremo che quei corpi *posseggono quantità uguali di elettricità* o *uguali cariche* o *uguali masse elettriche*.

Si abbia ora un corpo B tale che, introdotto dentro il cilindro di Faraday, determini nell' elettroscopio una deviazione uguale a quella che si ottiene allorchè si introducono *due* qualunque dei corpi $A_1, A_2, \ldots A_n$ *simultaneamente:* diremo allora che B possiede una quantità di elettricità *doppia* di quella di uno qualunque dei corpi A.

E così, in generale, se un corpo X, introdotto nel cilindro, produce nell' elettroscopio una deviazione uguale a quella prodotta da m corpi $A_1, A_2, \ldots A_n$ presi insieme, si dirà che X possiede una quantità di elettricità *m volte maggiore* di quella posseduta da uno qualunque dei corpi $A_1, A_2, \ldots A_n$.

Perciò, se si sceglie una certa quantità di elettricità come *unità*, il cilindro di Faraday permette la misura delle quantità di elettricità; le quali, per conseguenza, potranno tutte esser contrassegnate da numeri.

253 — Quantità di elettricità positive e negative. — Le considerazioni che or ora abbiamo svolto, si riferivano a corpi carichi di elettricità della stessa specie, sia che si trattasse di elettricità vitrea, come di quella resinosa.

Così, fissata una unità per le cariche vitree e una per quelle resinose, ogni carica elettrica può esser misurata senza nessuna ambiguità.

Però è utile poter collegare queste due specie di elettricità, in modo che ne risulti una unità di misura unica. Ciò viene agevolato dal seguente esperimento.

Prendiamo due corpi aventi stato elettrico diverso, e tali che messi separatamente dentro il cilindro di Faraday determinino nell' elettroscopio deviazioni uguali. Per ottener in modo semplice due corpi in siffatte condizioni, basta mettere a contatto fra loro due sfere di ottone A, B (fig. 216), sostenute da manichi isolanti, e portarle così insieme in presenza di un corpo elettrizzato M. Allontanando allora le due sfere, esse risultano — pel fenomeno d' influenza (§ 248) — cariche di elettricità di diversa specie; e si trova appunto che — poste *successivamente* dentro il cilindro di Faraday — determinano deviazioni uguali nell' elettroscopio.

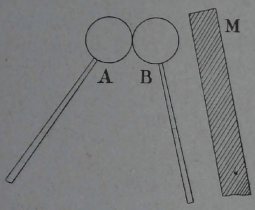


Fig. 216

Orbene, se introduciamo *simultaneamente* le due sfere nel cilindro, troveremo che l' elettroscopio non devia affatto.

Questo si suole esprimere dicendo che *la sovrapposizione di due cariche elettriche di specie diversa, ma tali che ad esse separatamente corrisponda una stessa deviazione dell' elettroscopio, dà una carica nulla.*

Siffatto esperimento ci indica l' opportunità di attribuire lo stesso valore assoluto alla misura di due cariche di specie diversa che, introdotte nel cilindro di Faraday, determinano nell' elettroscopio deviazioni uguali; e di distinguere le cariche resinose dalle cariche vitree, attribuendo alle loro misure segni diversi.

Precisamente si attribuisce il segno + ai numeri che misurano cariche vitree, e il segno — alle misure di cariche resinose.

Comunemente poi, invece degli aggettivi vitreo e resinoso, si useranno rispettivamente questi altri: *positivo* e *negativo*.

254 — Legge della conservazione dell' elettricità. — Servendoci sempre del cilindro di Faraday (§ 251), possiamo ora dimostrare che se un corpo *A* elettrizzato, in esso introdotto, produce una certa deviazione della foglia dell' elettroscopio, la stessa deviazione è prodotta anche se noi per contatto ripartiamo la carica di *A* fra un numero qualsiasi di corpi e poi mettiamo tutti questi corpi dentro al cilindro.

A tal uopo carichiamo un corpo isolato, e determiniamo la deviazione che subisce l' elettroscopio quando tale corpo venga introdotto nel cilindro di Faraday *senza che lo tocchi.*

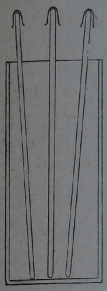


Fig. 217

Estratto poi il corpo (e allora la foglia dell' elettroscopio si abbassa del tutto), tocchiamo il corpo stesso con un piccolo cappuccio di stagnola sostenuto con una bacchetta di vetro paraffinata, e quindi gettiamo rapidamente il cappuccio dentro il cilindro. L' operazione può essere ripetuta con parecchi di questi cappucci (fig. 217): di mano in mano che essi vengono gettati nel cilindro, la foglia dell' elettroscopio assume deviazioni sempre maggiori. Se poi alla fine introduciamo nuovamente il corpo elettrizzato primitivo dentro il cilindro, vediamo che la foglia prende esattamente la posizione assunta nella prima esperienza.

Dunque possiamo concludere che *una determinata carica, posseduta da un corpo isolato, ha una misura che è affatto indipendente da qualunque ripartizione che di essa per conduzione può farsi fra un numero qualsiasi di corpi.*

In altre parole, nei passaggi da un corpo a un altro per conduzione, l' elettricità, misurata secondo le nostre convenzioni *non si crea nè si distrugge.*

Questo però è un caso particolare di una legge più generale sulla conservazione dell' elettricità, che si enuncia così:

Qualunque siano i fenomeni meccanici, fisici, chimici, e biologici, che si producono in un qualunque sistema di corpi perfettamente isolati, la somma algebrica dei numeri, che misurano le quantità di elettricità che il sistema contiene, è costante.

Così, è impossibile creare una certa quantità di elettricità positiva senza creare nello stesso tempo una quantità uguale di elettricità negativa. Quando, per es., con un panno si strofina un bastone di ebanite, insieme con l' elettricità negativa

che si produce sul bastone, si sviluppa dell'elettricità positiva sul panno. E di ciò possiamo senz'altro assicurarci prendendo il panno con un manico isolante e avvicinandolo all' elettroscopio.

Che poi le quantità di elettricità di diversa specie che insieme si producono siano rigorosamente uguali, possiamo verificarlo introducendo il panno nel cilindro di Faraday e strofinando contro di esso — lì dentro — il bastone di ebanite (fig. 218).

Fig. 218

Si osserva che l'elettroscopio non devia, finchè il bastone rimane immerso nel cilindro. Ma appena lo si estrae, la foglia subisce una forte deviazione, dimostrando nel panno una carica, che si trova essere di segno opposto a quello dell'ebanite, e che, potendo essere perfettamente neutralizzata da quella, deve essere in quantità uguale.

255 — Passaggio totale dell' elettricità da un conduttore ad un altro. — Mediante il contatto fra due corpi, in generale non tutta l'elettricità che si trova su uno di essi passa nell' altro: fra i due corpi si verifica invece una ripartizione di cariche. Però c' è anche il modo di far sì che un corpo ceda tutta intera la sua carica ad un altro, rimanendo completamente scarico.

Fig. 219

Infatti, quando un corpo si trova in una cavità perfettamente chiusa contenuta in un altro (fig. 219), allora, se avviene il contatto fra i due corpi, tutta la carica posseduta dal primo passa nel corpo avvolgente.

Ci si convince subito di ciò, servendosi di una sfera metallica sorretta da un piede isolante (fig. 220) e di due emisferi dello stesso metallo, portati pure da manichi isolanti. Si elettrizza la sfera e poi si pongono a contatto con essa i due emisferi che la inviluppano totalmente. Allontanando in seguito i due emisferi, si trova che questi si sono elettrizzati, mentre la sfera si è del tutto scaricata.

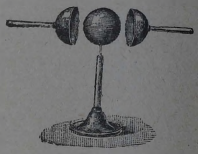


Fig. 220

Più semplicemente si può dimostrare lo stesso fatto, valendosi ancora del cilindro di Faraday.

Se un corpo elettrizzato in esso introdotto viene messo a contatto con la parete, esso resta scarico; la deviazione dell'elettroscopio permane anche quando il corpo è stato estratto dal cilindro, mostrando che a quest' ultimo, nel contatto, si è comunicata stabilmente tutta la carica del primo.

256 — **Sede della carica elettrica.** — Le esperienze precedenti portano a concludere che la carica elettrica in equilibrio in un conduttore si trova tutta localizzata alla superficie di questo. Infatti, qualunque pezzo interno del conduttore si trova nelle condizioni di un corpo carico posto entro una cavità di un conduttore, a contatto colle pareti.

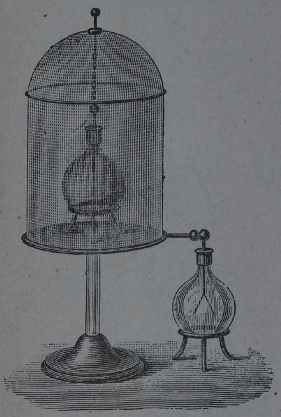


Fig. 221

Faraday ha dimostrato la stesso cosa direttamente per mezzo di una camera a pareti conduttrici, poggiata su piedi di vetro, entro la quale si pose egli stesso con alcuni elettroscopi delicatissimi. La camera veniva caricata esternamente con una macchina elettrica. Mettendo allora in comunicazione la parete interna con gli elettroscopi, non potè constatare con questi il minimo indizio di elettricità.

L' esperienza si può agevolmente ripetere collocando un elettroscopio sopra un piatto isolato (fig. 221) e coprendolo con una gabbia di rete metallica unita ad un altro elettroscopio esterno. Caricando poi la gabbia con una macchina elettrica, si vedranno divergere le foglioline dell' elettroscopio esterno, mentre quelle dell' interno non si muovono affatto.

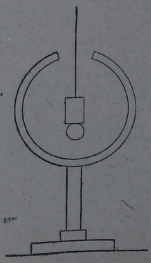


Fig. 222

Così pure, se si prende una sfera cava isolata (fig. 222), forata nella parte superiore, e per il foro s' introduce una pallina elet-

trizzata, abbassandola finchè tocchi la parete interna della sfera, si potrà poi constatare, per mezzo di un elettroscopio, che la sola parete esterna della sfera si presenta elettrizzata.

257 — **Legge di Coulomb.** — In uno dei primi fenomeni che ci rivelavano l'esistenza dello stato elettrico (§ 239), abbiamo riscontrato che fra i corpi elettrizzati si esercitano delle forze. Queste forze possono essere (§ 240) repulsive o attrattive, a seconda che sono fra loro in presenza cariche di specie uguale o diversa.

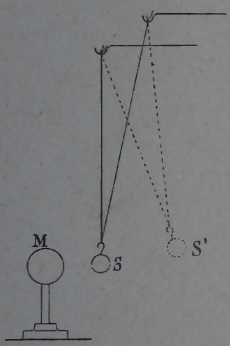


Fig. 223

Ebbene, Coulomb determinò, mediante un delicato apparecchio — detto appunto *bilancia di Coulomb* o *bilancia di torsione* — la relazione che lega la forza attrattiva o repulsiva tra due corpi elettrizzati, con le loro cariche. Egli trovò che, se si indica con F tale forza, e con m, m' le cariche elettriche dei due corpi posti alla distanza r, si ha

$$F = k \frac{m m'}{r^2}, \qquad (1)$$

indicando con k un coefficiente di proporzionalità.

Ossia *la forza che si esercita tra due sfere elettrizzate è proporzionale direttamente alle loro cariche elettriche* m, m', *e inversamente al quadrato della distanza* r *dei centri delle due sfere.*

Questa legge può essere dimostrata con un procedimento assai semplice. Una piccola sfera di sughero dorata S (fig. 223), è sostenuta da una lunga sospensione bifilare, costituita di due fili di bozzolo leggermente divaricati, in modo da costringere S a muoversi in un piano. Un'altra sfera metallica, M, portata da un sostegno isolante, può spostarsi davanti ad S. Per mezzo di un fascio di luce si proietta l'ombra delle due sfere sopra uno schermo, sul quale è disegnata una scala divisa in centimetri.

Dopo aver fissato su tale scala il numero che corrisponde alla posizione di riposo della pallina S, si carica la sfera M e la si porta poi a contatto con S. Allora una parte della carica di M passerà su S, e le due sfere si respingeranno.

La sfera sospesa non starà più, ora, nella medesima posizione di riposo, ma disterà da questa di una lunghezza x che leggeremo sulla scala. Nella nuova posizione la pallina S subisce — per parte della gravità — una forza f che, per piccoli valori di x, è proporzionale ad x; poichè essa fa equilibrio alla forza di repulsione tra le due sfere, può servire anche a misurare quest'ultima.

Spostiamo ora la sfera M mantenendola nel piano verticale che passa per S, e in modo che S si allontani dalla primitiva posizione di riposo, successivamente, di 4, 9, 25 divisioni della scala.

Corrispondentemente leggeremo sulla scala le distanze dei centri delle sfere: siano $\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5$. Sarà facile constatare che

$$\delta_2 \times 2 = \delta_3 \times 3 = \delta_4 \times 4 = \delta_5 \times 5.$$

Ossia, il prodotto della distanza dei centri per la radice quadrata della forza f è una costante:

$$\delta \cdot \sqrt{f} = \text{costante};$$

e ciò vuol dire che f è inversamente proporzionale al quadrato di δ.

Ora alla sfera M avviciniamo un'altra sfera identica isolata, fino a toccarla. La carica di M diventerà metà di quella precedente, mentre quella di S resterà invariata. Si troverà, in tale condizione, che alle distanze δ_2, δ_3, δ_4, δ_5 corrispondono spostamenti di S dalla posizione di riposo metà di quelli precedentemente trovati. Parimente, se la carica di M diventa un quarto, gli spostamenti di S divengono rispettivamente la quarta parte; e così di seguito.

Un risultato analogo si troverebbe per l'attrazione mutua che si eserciterebbero M ed S quando fossero cariche d'elettricità di specie diversa.

Dunque *la forza agente tra due sfere elettrizzate è proporzionale direttamente alle loro cariche elettriche, ed inversamente al quadrato delle distanze dei loro centri.*

258 — **Unità di quantità di elettricità.** — La formula generale or ora dimostrata,

$$F = k \frac{mm'}{r^2},$$

contiene un coefficiente k, il cui valore dipende dalle unità di misura scelte per le forze, le distanze e le masse elettriche; e dipende anche dal mezzo in cui si trovano i corpi elettrizzati.

Se noi fissiamo che nell' aria sia $k = 1$, e supponiamo già scelte le unità di forza e di lunghezza, la (1) ci dà, come conseguenza, l' unità di quantità di elettricità. Infatti, quando sia

$$k = 1, \qquad F = 1, \qquad r = 1,$$

potremo porre

$$m = 1, \qquad m' = 1;$$

cioè, *l' unità di quantità di elettricità* o *unità di massa elettrica* sarà quella posseduta da una sfera, la quale respinga nell' aria, con una *forza unità*, un' altra sfera identica, con una carica uguale, posta alla *distanza unitaria*.

Nel sistema *[C. G. S.]* l' unità di lunghezza è il *centimetro* e l' unità di forza la *dina* (Vol. I, § 100).

Dunque *l' unità elettrostatica [C. G. S.] di quantità di elettricità è quella che agisce sopra una quantità uguale, posta nell' aria alla distanza di 1 centimetro, con una forza uguale ad una dina.*

È questa però una quantità troppo piccola; quindi comunemente si adopera come unità una quantità 3×10^9 volte più grande, alla quale è stato dato il nome di *unità pratica di elettricità* o anche il nome di *coulomb*.

Come si vede, il coulomb è immensamente più grande dell' unità *[C. G. S.]* di quantità di elettricità. Due sfere cariche ciascuna di 1 coulomb dovrebbero essere poste alla distanza di 30000 km. per attrarsi o respingersi con la forza di 1 dina; e quando invece le due sfere fossero alla distanza di 1 kilometro, si attrarrebbero o si respingerebbero con la forza di 9×10^8 dine, ossia di 900 kilogrammi circa.

Potenziale elettrico.

259 — Vediamo ora da quali circostanze è accompagnato il passaggio di elettricità che si verifica quando fra due conduttori elettrizzati si stabilisce una comunicazione metallica.

Due casi possono verificarsi:

a) i corpi, anche dopo posti a contatto, mantengono inalterate le proprie cariche;

b) appena avviene il contatto, si verifica fra i corpi uno scambio di elettricità.

Nel primo caso noi diremo che i due conduttori sono *a potenziale uguale*. Nel secondo, che i due conduttori sono *a potenziale diverso;* e precisamente, se i due conduttori sono carichi della stessa specie di elettricità, diremo che ha potenziale *più alto* quello che pel contatto cede elettricità all'altro.

Le varie parti di un conduttore si possono considerare come tanti conduttori comunicanti tra loro. Quindi se in un conduttore omogeneo l'elettricità è in equilibrio, tutti i suoi punti sono a potenziale uguale, e questo potenziale si chiama il *potenziale del conduttore*.

260 — Il potenziale di un conduttore dipende dalla posizione di questo. — Preso un conduttore isolato e dotato di una determinata carica, il suo potenziale dipende dalla posizione che esso occupa nello spazio *relativamente agli altri corpi*.

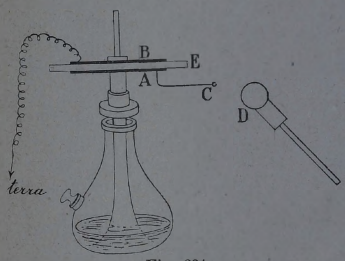


Fig. 224

Infatti, prendiamo un disco di rame *A* (fig. 224) collocato sopra un isolatore Mascart: su di esso poniamo una lastra di ebanite *E*, e su quest'ultima infine poggiamo un altro piatto *B*, identico ad *A*, e messo in comunicazione con la terra mediante un filo metallico. Comunichiamo, per mezzo della sferetta *C*, al disco isolato *A* una certa carica, poi tocchiamo *C* con un conduttore *D* retto da un manico isolante. Allora dal disco *A* passerà dell'elettricità nel conduttore *D finchè i potenziali dei due conduttori non siano uguagliati* (§ 259). In queste condizioni *D* ha assunto una certa carica, la quale, introdotta nel cilindro di Faraday, produrrà — nell'elettroscopio a quello congiunto — una deviazione che noi noteremo.

Ora allontaniamo il disco *B*, e facciamo di nuovo comunicare *D* con *C*. Se, dopo ciò, si rimette il conduttore *D* dentro il cilindro di Faraday, si osserva nell'elettroscopio — prima scaricato — una deviazione assai più grande della precedente;

il che vuol dire che il potenziale del conduttore *A* è maggiore in quest' ultimo caso, che non quando ad esso stava vicino *B*.

Ne segue che, per provare se due corpi conduttori hanno lo stesso potenziale, bisogna lasciarli nelle loro rispettive posizioni; converrà pure, per metterli in comunicazione, servirsi di un filo conduttore *molto sottile* — perchè un filo un po' grosso potrebbe modificare il potenziale del conduttore al quale viene congiunto. — Quando peraltro si mettono i due conduttori direttamente a contatto, si constata la uguaglianza dei loro potenziali soltanto per la posizione immediatamente vicina a quella che occupano durante il contatto medesimo.

261 — Potenziale di una pila. — Speciale osservazione bisogna fare a proposito del potenziale che assume un conduttore che sia in comunicazione con un polo di una pila (§ 250).

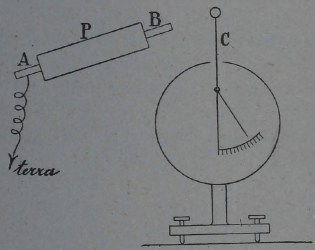


Fig. 225

Prendiamo una pila a secco *P* (fig. 225), e tenendola in mano per un estremo *A*, tocchiamo con l'altro *B*, l'asta *C* di un elettroscopio; la quale supponiamo costituita dello stesso metallo di *B*. In queste condizioni il polo *A* della pila è messo a terra (§ 242). L'elettroscopio finisce con l'assumere una determinata deviazione; allora, fra l'elettroscopio e il polo *B* della pila, non c'è più scambio di elettricità, ossia, per definizione, *B* e *C* sono allo stesso potenziale.

Adesso, invece di mettere a terra un estremo della pila, mettiamovi un punto intermedio di essa, infilando, per es., un ago *I* (fig. 226) fra due dischi di carta della pila e tenendo in mano l'ago stesso.

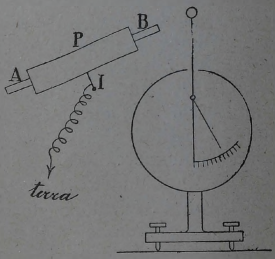


Fig. 226

Toccando allora l'elettroscopio, si vede che la foglia si abbassa, ossia che l'elettroscopio cede elettricità al polo della pila; e ciò — secondo la nostra definizione (§ 259) — significa che ora il potenziale del polo *B* della pila è più basso del potenziale dell'asta dell'elettroscopio. Dunque, in questo secondo caso il potenziale del polo *B* è diverso da quello che aveva quando a terra era posto l'altro polo *A*, e precisamente è più basso.

Quindi, per togliere qualunque ambiguità, converremo di chiamare *potenziale di un polo di pila (elemento o insieme di elementi) il potenziale che ha quel polo, quando l'altro polo è in comunicazione con la terra.*

262 — Leggi del potenziale della pila. — Definito così il potenziale di un polo di pila, vediamo come esso si comporta col variare delle condizioni esterne.

Il potenziale di un polo di pila non dipende dalla posizione dei corpi circostanti. Infatti, se si mette in comunicazione mediante un lungo filo metallico l'elettroscopio con un polo di una pila a secco — della quale l'altro polo è a terra — fino a fare acquistare ai due conduttori lo stesso potenziale, si trova che la deviazione dell'elettroscopio non cambia se al polo della pila, che è in contatto con esso, si avvicina un conduttore, anche se posto in comunicazione col suolo.

Inoltre, *il potenziale di una pila non varia se dalla pila si estraggono delle cariche, o se ad essa se ne comunicano.*

Invece si trova che *il potenziale di una pila varia con la costituzione dei suoi elementi, con la concentrazione delle sue soluzioni, e con la temperatura.*

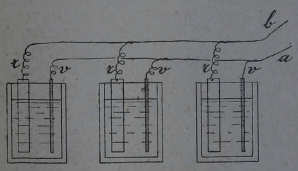


Fig. 227

Nel riunire poi insieme più elementi uguali per formare una pila, possiamo congiungere insieme tutti i poli positivi *v* dei vari elementi da una parte, e tutti i poli negativi *r* dall'altra (fig. 227). Allora l'insieme dei primi costituirà un unico polo positivo *a*, che avrà il potenziale stesso che aveva il polo positivo di ciascun elemento: e infatti sappiamo che congiungendo più corpi al medesimo potenziale, non si verifica

tra loro alcuno scambio di elettricità. Lo stesso dicasi dell' insieme dei poli negativi, che costituiranno un unico polo negativo *b*.

Questo modo di congiungere tra loro i vari elementi di una pila dicesi riunione *in derivazione* o *in quantità*, e in tal caso la pila prende anche il nome di *batteria*.

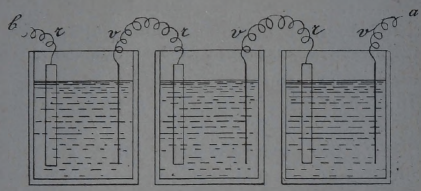


Fig. 228

Possiamo invece congiungere gli elementi della pila in altro modo, collegando il polo positivo *v* di ciascuno di essi col negativo *r* del seguente, formando la riunione *in serie* (fig. 228) Allora il potenziale del polo positivo *a* della pila viene ad assumere un valore più elevato di quello che aveva il polo corrispondente di ciascun elemento.

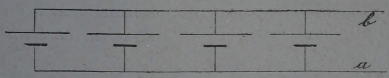


Fig. 229

Se si conviene di rappresentare schematicamente i poli di un elemento di pila con due segmenti paralleli di lunghezza diversa, allora i due modi di riunire in una sola pila varî elementi, sono indicati rispettivamente dalle figure 229 e 230.

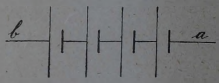


Fig. 230

263 — **Misura dei potenziali.** — Da quanto abbiamo fin qui esposto, risulta evidente l' importanza che assume, nello studio dei fenomeni elettrici, la conoscenza del *valore* del potenziale dei corpi elettrizzati. È quindi necessario poterne fare la misura. A tal uopo stabiliamo opportune convenzioni.

1.° *Convenzione di neutralità.* — Si abbia una pila qualsiasi costituita di elementi in determinate condizioni di

costituzione e di temperatura. Se il numero a misura il potenziale di uno dei suoi poli (§ 261), converremo che il potenziale dell' altro polo sia misurato da $-a$. Conveniamo poi di riservare i numeri positivi ai poli positivi.

2.° *Convenzione di addittività.* — Sia a il valore del potenziale di un polo di un elemento di pila: allora, per convenzione, riunendo in serie *due* elementi identici, diremo che il potenziale della pila è $2a$, riunendo 3 elementi, $3a$, etc.; riunendo insieme n elementi, diremo che il potenziale è na.

3.° *Convenzione di relatività.* — Al suolo, e a qualunque conduttore in comunicazione col suolo, stabiliamo che competa il *potenziale zero*.

E con ciò il valore a che si attribuisce al polo di un elemento — di cui l' altro polo è a terra (ossia a potenziale nullo) — esprime la *differenza* fra i potenziali dei suoi due poli.

Allora, per misurare il potenziale di un conduttore, sceglieremo anzitutto un elemento di pila da assumersi come *campione*, e paragoneremo — nel modo che tra poco si vedrà — il potenziale del conduttore considerato, con quelli di tanti gruppi di uguali elementi campioni riuniti in serie.

264 — Unità di potenziale. — Intanto si capisce che per *unità di misura* del potenziale potremo scegliere un dato elemento di pila, purchè in condizioni perfettamente determinate di costituzione e di temperatura.

Ma le pile che per ora abbiamo descritte (§ 250) non si prestano all'uopo, perchè la differenza di potenziale tra i poli non si mantiene costante, e varia in maniera notevole con circostanze che non dipendono da noi. Così, nella pila voltaica si altera rapidamente la costituzione del liquido, per il fatto che l' acido solforico ivi contenuto reagisce con lo zinco formando solfato di zinco.

Si presta invece molto bene una particolare pila a mercurio, che mantiene la stessa costituzione indefinitamente, e che, dal nome del suo inventore, si chiama *pila Weston*.

Essa è costituita da un vaso di vetro a forma di H (fig. 231), nelle cui basi penetrano due fili di platino f, f' che formano i poli della pila. Una delle branche contiene una piccola quantità di mercurio puro, M, al quale è sovrapposto uno strato P di pasta di solfato mercuroso, e poi uno strato, C, di cristalli

di solfato di cadmio. L'altra branca contiene una piccola quantità di amalgana di cadmio, *A*, alla quale è sovrapposto uno strato *C'* di cristalli di solfato di cadmio. Nelle due branche del recipiente si versa poi una soluzione satura di solfato di cadmio, *SS*, e le estremità delle due provette vengono chiuse ermeticamente.

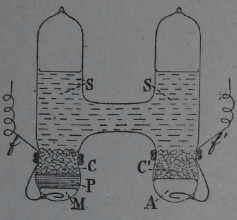


Fig. 231

La differenza di potenziale ai poli della pila Weston, però, non si prende direttamente per unità, giacchè storicamente l'unità di potenziale, definita con altri criteri, era già fissata, quando fu inventata la pila Weston.

Per convenzione, *l'unità di potenziale è la* $\frac{1}{1,019}$ *parte della differenza di potenziale che esiste ai poli della pila Weston a 15° C.* Tale unità si chiama *volta*.

265 — Uso dell'elettroscopio nella misura dei potenziali. — La definizione stessa di potenziale (§ 259) ci offre un mezzo molto semplice per i confronti che son necessarî (§ 263) alla misura del potenziale di un conduttore.

A questo scopo serve benissimo l'elettroscopio.

Infatti, la deviazione delle foglie è caratteristica di una carica ben determinata, il cui aumento, o la cui diminuzione, son rivelati dall'aumento o dalla diminuzione della deviazione delle foglie. Ora, prendiamo diverse pile formate di elementi di dato potenziale riuniti in serie, e portiamo il polo positivo di ciascuna successivamente a contatto con l'elettroscopio, mentre il polo negativo della pila stessa comunica con la terra. Otterremo nell'elettroscopio deviazioni via via differenti. Se intanto, mentre l'elettroscopio è stato caricato con una di queste pile — quella di *3* elementi, per es. — noi congiungiamo all'elettroscopio un conduttore *A* elettrizzato positivamente, senza ottenere alcun mutamento nella deviazione delle foglie, vorrà dire che il corpo *A* ha lo stesso potenziale dell'elettroscopio, ossia della pila di *3* elementi.

Dunque, una volta fatto questo confronto, diremo che un conduttore avrà il potenziale corrispondente alla pila di *n* elementi in serie, quando, messo in comunicazione con l'elettro-

scopio, non produce cambiamento nella deviazione ch'era stata prodotta da quella pila.

Se il conduttore fosse stato carico negativamente, avremmo invece — s'intende — confrontato il suo potenziale con quello dei poli negativi delle pile, tenendo a terra (§ 261) i poli positivi di queste.

266 — **Scintilla elettrica.** — Se si aumenta a poco a poco la differenza di potenziale fra due conduttori, si produce, a un certo valore di questa differenza, una *scintilla*, la quale — stabilendo una momentanea comunicazione fra i due conduttori — determina il passaggio dell'elettricità dall'uno all'altro.

La differenza di potenziale necessaria per produrre una scintilla fra due conduttori, dipende dalla loro forma, dalla loro posizione relativa, e dal coibente interposto.

Nell'aria — fra due sfere di 2 cm. di diametro — si hanno le seguenti differenze di potenziale corrispondenti alle varie loro distanze d:

$d =$	0,1 cm.	diff. di	potenziale	volta	500
	0,5 »	»	»	»	27000
	1 »	»	»	»	49000
	10 »	»	»	»	119000
	15 »	»	»	»	128000

267 — **Azione delle punte.** — La differenza di potenziale fra due conduttori necessaria perchè fra essi avvenga una scintilla, è tanto minore, quanto più sono piccole le dimensioni dei conduttori stessi. Per esempio, fra due sfere di 2 millimetri di diametro, una scintilla lunga 1 centimetro si produce con una differenza di potenziale di 17000 volta soltanto.

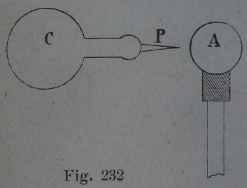


Fig. 232

Se poi uno dei conduttori è foggiato a punta, la scarica avviene con straordinaria facilità, specialmente se davanti alla punta si trova un corpo qualsiasi carico di elettricità opposta a quella del conduttore. In tal caso non si ha vera e propria scintilla, ma una scarica così detta *a effluvio*, la quale è accompagnata da un bagliore violaceo visibile soltanto nell'oscurità presso la punta. Così, se al conduttore C (fig. 232) munito di una punta P e carico di elettricità, avviciniamo un conduttore A isolato e

inizialmente allo stato neutro, si trova che dell'elettricità si disperde dalla punta e passa sul conduttore A.

Se, invece, carichiamo A e manteniamo isolato il conduttore C, allora si determina su questo, per influenza, l'elettricità di segno contrario a quella di A, la quale — disperdendosi dalla punta — passa su A e lo neutralizza. Se dopo ciò A si allontana, il corpo C rimane elettrizzato; giacchè ora, mancando il corpo A, la scarica dalla punta non può avvenire, finchè il suo potenziale non supera un certo limite.

268 — Forza elettromotrice. — Siccome adunque una differenza di potenziale tra due conduttori porta sempre un movimento di elettricità dall' uno all' altro, quando essi siano posti in comunicazione, così alla differenza di potenziale — considerata come la causa di tale movimento — si dà il nome di *forza elettromotrice;* e si suole indicare brevemente questa espressione con la sigla *f.e.m.*

Così, la differenza di potenziale tra i poli di una pila dicesi *forza elettromotrice della pila.*

Capacità elettrostatica.

269 — Relazione fra la carica di un conduttore e il suo potenziale. — Si verifica che un conduttore — la cui posizione rispetto agli altri corpi sia fissa — ha un potenziale ben determinato, in corrispondenza ad ogni carica elettrica da lui posseduta. Cerchiamo, perciò, qual'è la relazione che lega la sua carica al suo potenziale.

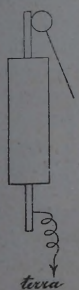


Fig. 233

Per trattare un caso semplice, supponiamo di avere un conduttore carico, in presenza di conduttori posti tutti in comunicazione col suolo.

In tal caso l' esperienza dimostra che *la quantità di elettricità che il corpo possiede è proporzionale al suo potenziale.*

Infatti, portiamo un corpo isolato — per es. una sfera metallica attaccata ad un manico isolante (fig. 233) — a un determinato potenziale, ponendola in comunicazione con un polo di una pila a secco, della quale l' altro polo sia a terra. Allora il conduttore assumerà una certa carica, che noi comunicheremo nella sua totalità ad un cilindro di Faraday connesso con un elettroscopio.

Ripetiamo la stessa operazione un certo numero di volte, per es. 5, sempre portando il conduttore a contatto con lo stesso polo della pila e comunicando tutta la carica da esso assunta all' elettroscopio. Alla fine la foglia di quest' ultimo avrà raggiunto una certa deviazione, che noi leggeremo sopra una scala graduata.

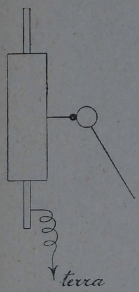


Fig. 234

Adesso scarichiamo l' elettroscopio mettendolo in comunicazione con la terra; poi ricominciamo la stessa operazione fatta precedentemente, adoperando però non un polo della pila, ma uno spillo metallico piantato a metà di essa (fig. 234): così facendo, si utilizza solo metà degli elementi della pila.

Orbene, si osserva che è necessario caricare ora lo stesso conduttore un numero doppio di volte, ossia 10 volte, per ottenere nell' elettroscopio la stessa deviazione che si aveva prima.

Dunque, allorquando il conduttore è portato al potenziale di tutta la pila, esso assume una carica doppia di quando il suo potenziale è quello di metà della pila stessa.

Perciò, chiamando Q la quantità di elettricità di un conduttore a potenziale V, in un ambiente in cui tutti gli altri corpi sono a potenziale 0, si ha

$$Q = CV; \quad \text{oppure} \quad \frac{Q}{V} = C, \qquad (2)$$

dove C è una costante.

270 — **Capacità elettrostatica.** — Questo rapporto costante, C, è caratteristico della forma e delle dimensioni del conduttore, oltre che della posizione che questo occupa rispetto ai corpi circostanti (specialmente se posti in comunicazione col suolo).

La conoscenza di tale rapporto per un dato conduttore dà la possibilità di valutare il suo potenziale quando ne sia nota la carica, o viceversa.

Data l' importanza di tale costante, si è creduto bene di designarla con un nome, e si è chiamata *capacità del conduttore*.

Dalla formula

$$\frac{Q}{V} = C$$

si vede che si ha $C = Q$, quando è $V = 1$; cioè *la capacità è misurata dalla carica che il conduttore deve assumere, perchè il suo potenziale salga da 0 a 1.*

271 — Unità di capacità. — Avendo stabilito l'unità di elettricità (coulomb) e l'unità di potenziale (volta), sarà facile dedurne l'*unità di capacità*, la quale è stata chiamata *farad*. Essa è rappresentata dalla *capacità di un conduttore che richiede la carica di 1 coulomb per acquistare il potenziale di 1 volta.*

Questa unità è eccessivamente grande per gli usi pratici; un farad è una capacità uguale a circa 1400 volte quella del globo terrestre. Si usa perciò misurare la capacità in milionesimi di farad, ossia in *microfarad*. Il microfarad è una capacità equivalente a quella di una sfera di 9000 metri di raggio, isolata nello spazio. La capacità della Terra è 708 microfarad.

272 — La capacità cresce col crescere delle dimensioni del conduttore. — La capacità di un conduttore aumenta col crescere della sua superficie.

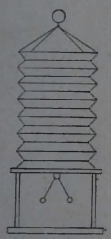


Fig. 235

Poniamo, infatti, sopra un piatto d'ottone isolato, un cilindro di carta dorata e pieghettata come mostra la figura 235 (uno dei soliti palloncini da luminarie), in modo che si possa variarne le dimensioni tirandolo o comprimendolo. E al piatto d'ottone uniamo, come elettroscopio, una coppia di pendolini.

Se carichiamo il cilindro mentre trovasi in una posizione qualsiasi, i pendolini divergeranno: ora osserviamo, che tale divergenza aumenta se schiacciamo il cilindro, e diminuisce, invece, se noi lo allunghiamo.

Nel primo caso la maggior divergenza dei pendolini indica un elevamento di potenziale, e quindi — poichè la quantità di elettricità sul cilindro resta la stessa — una diminuzione di capacità; nel secondo caso il potenziale diminuisce, e quindi la capacità aumenta. Si conclude, dunque, che se cresce la superficie di un corpo, cresce insieme la sua capacità.

E si dimostrerebbe — in particolare — che due corpi geometricamente simili (come ad es. due cubi, o due sfere, ecc.) hanno capacità proporzionali alle dimensioni omologhe (cioè proporzionali agli spigoli per i cubi, ai raggi per le sfere, ecc.).

273 — La capacità varia col variare della distanza dai conduttori circostanti. — La capacità di un conduttore inoltre varia — come già accennammo (§ 270) — con la distanza dai conduttori circostanti. Si abbia, infatti, un conduttore *A* elettrizzato (fig. 236), posto sopra un sostegno isolante e comunicante con un elettroscopio *C*. Se ad *A* avviciniamo un secondo conduttore, *B*, l'elettroscopio indica che il potenziale di *A* si abbassa, a mano a mano che diminuisce la distanza tra *B* ed *A*; il potenziale cresce invece col crescere di quella distanza. La diminuzione o l'aumento sono molto più sensibili, se il conduttore *B* comunica col suolo. Poichè la carica su *A* resta invariata, noi potremo dunque dire che la capacità elettrica di un conduttore aumenta quando gli si approssima un altro conduttore, e in maggior misura se questo è in comunicazione col suolo.

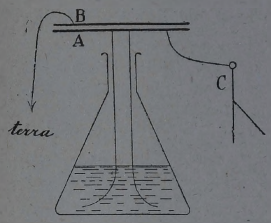


Fig. 236

Facendo poi le misure, si trova che, se i conduttori *A* e *B* sono due lastre parallele, abbastanza grandi rispetto alla loro distanza, la capacità di *A* risulta inversamente proporzionale alla distanza stessa.

274 — La capacità varia con la natura del dielettrico. — La capacità di un conduttore, infine, varia pure con la natura del mezzo isolante che lo separa dai corpi circostanti, ossia colla natura del *dielettrico*.

Infatti, tenuto fisso il conduttore *B*, ed osservata la deviazione dell' elettroscopio in comunicazione con *A*, interponiamo tra *A* e *B* una lastra isolante, *L* (fig. 237), per esempio di ebanite.

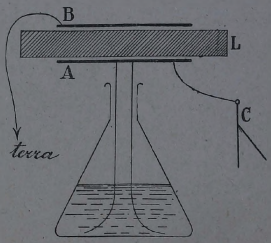


Fig. 237

Vedremo la foglia dell' elettroscopio abbassarsi, indicando una diminuzione del potenziale di *A*, ossia un aumento della sua capacità. Se, invece

dell' ebanite, poniamo tra A e B un altro dielettrico (vetro, paraffina, zolfo, ecc.), vedremo ogni volta variata la capacità del conduttore A.

275 — Capacità induttiva specifica. — Per tener conto di questa influenza dei vari dielettrici, essi vengono confrontati con uno determinato di essi: ordinariamente coll' aria. A tal uopo si prendono due conduttori di forma opportuna — ad es. due lastre come nella figura 237 — uno dei quali sia isolato, e l' altro posto in comunicazione col suolo. Si valuta la capacità c del primo, quando il mezzo fra essi interposto è l' aria, poi ancora si valuta la capacità c_1 quando l' aria sia sostituita con un altro dielettrico: il rapporto $\frac{c_1}{c}$ si chiama *capacità induttiva specifica* o *potere induttore specifico* di quel particolare dielettrico, rispetto all' aria.

Nella tabella seguente sono riportati i valori della capacità induttiva specifica degl' isolanti più comuni:

aria = 1

paraffina	1,98	a 2,32	solfuro di carbonio	1,8
ebanite	2	a 2,8	petrolio	2
zolfo	2,5		trementina	2,2
gommalacca	3,10		idrogeno	0,9996
vetro	6.96		metano	1,0007
mica	5,7	a 8	anidride carbonica	1,0003.

Condensatori.

276 — Leggi sui condensatori. — Ora, al sistema di due conduttori, che si trovino — come quelli della figura 236 — affacciati e vicini per una gran parte della loro superficie, separati dall' aria o da un altro dielettrico qualunque, si dà il nome di *condensatore elettrico*.

I due conduttori si chiamano *armature* del condensatore; quello che si mette in comunicazione cen la sorgente di elettricità prende poi il nome di *collettore*, l'altro in comunicazione con la terra si suol chiamare *condensatore*.

Dicesi *capacità di un condensatore* la capacità di una delle sue armature (§ 270) quando l' altra è in comunicazione col suolo.

Ricordando allora quanto abbiamo esposto nei paragrafi 272, 273, 274, potremo dire che un condensatore — le cui armature sian parallele e a distanza assai piccola di fronte alle loro dimensioni — ha una capacità:

a) *direttamente proporzionale alla superficie delle armature;*

b) *inversamente proporzionale alla loro distanza;*

c) *direttamente proporzionale al potere induttore specifico del dielettrico interposto fra le due armature.*

277 — Varie forme di condensatori. — Nella pratica si danno ai condensatori forme varie, convenienti allo scopo per cui essi devon servire. I dispositivi più comunemente noti sono quello del condensatore di Epino e quello della bottiglia di Leida.

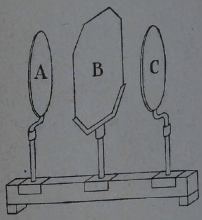


Fig. 238

Il *condensatore di Epino* è costituito da due lastre metalliche, *A* e *C* (fig. 238), tenute da sostegni isolanti, che si possono scorrere sopra un regolo, fino a portarle in contatto con le faccie di una lastra di vetro *B* interposta.

Si sogliono spesso fissare le lastre conduttrici sul vetro, e allora l' apparecchio prende il nome di *quadro di Franklin*. È costituito praticamente da una lastra di vetro, sulle cui faccie sono ap-

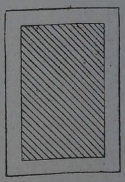


Fig. 239

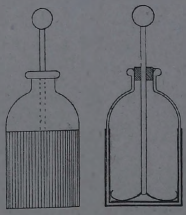


Fig. 240

plicati due fogli di stagnola, di dimensioni un po' più piccole della lastra (fig. 239).

Le parti del vetro non ricoperte dalla stagnola si verniciano con gommalacca, ch' è un ottimo isolante e non si ricopre di umidità.

La *bottiglia di Leida* (fig. 240) si compone di una bottiglia a largo collo, guarnita esternamente ed internamente di una foglia di stagno fino ad una certa altezza. Queste foglie costituiscono le armature. L' armatura interna comunica con un' asta metallica che attraversa il tappo della bottiglia.

278 — Batterie di condensatori. — Volendo accrescere la superficie di un condensatore, e quindi la sua capacità, conviene aumentare la superficie delle armature e diminuire lo spessore del dielettrico (§ 276); ma non si possono oltrepassare certi limiti. Perciò si suole raggiungere ugualmente lo scopo, prendendo diversi condensatori, e riunendo tra di loro tutte le armature di uno stesso ordine da una parte, e tutte le armature dell' altro ordine dall' altra parte. Per es. trattandosi di bottiglie di Leida, si riuniniscono tra loro tutte le armature esterne, e tra loro le armature interne. Si ha così una batteria di condensatori *in superficie* o *in quantità* (fig. 241).

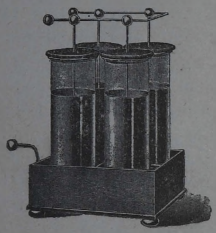


Fig. 241

Se invece uniamo le bottiglie di Leida, in modo che l' armatura interna di ognuna comunichi con l' armatura esterna della successiva (fig. 242), si ottiene una batteria di condensatori *in cascata*. La capacità del sistema in questo ultimo caso è però minore di quella di ogni singolo condensatore.

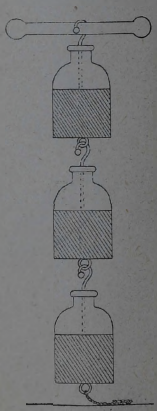


Fig. 242

Per gli usi industriali si sogliono costruire dei condensatori di grande capacità, sovrapponendo alternativamente un foglio di stagnola ad un foglio di mica o di carta paraffinata. Tutti i fogli di stagnola di posto dispari (il 1°, il 3°, il 5°, etc.) sporgono da un lato, sono riuniti insieme e formano un' armatura; i fogli di posto

pari sporgono dal lato opposto, e, pure riuniti fra loro, formano l' altra armatura. Il condensatore così fatto si rinchiude poi in una cassetta di legno, sul cui coperchio sono due serrafili isolati che comunicano rispettivamente con le due armature.

La batteria si carica come un solo condensatore, mettendo uno dei serrafili in comunicazione con la sorgente di elettricità, mentre l' altro è a terra.

La capacità di un condensatore in superficie — come quello ora descritto — *è la somma delle capacità dei singoli condensatori componenti.*

279 — Bottiglia di Lane. — Sulla notevole e costante capacità dei condensatori è fondato un metodo semplice per misurare delle quantità uguali di elettricità.

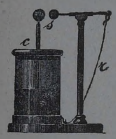


Fig. 243

Prendiamo, infatti, un condensatore c, che per semplicità supporremo a forma di bottiglia (fig. 243): mettiamo la sua armatura esterna in comunicazione, mediante il filo r, con una sferetta, affacciata, ad una distanza regolabile, ad un' altra sferetta congiunta all' armatura interna. Portiamo allora le due armature ad una differenza di potenziale V conveniente, perchè fra le due palline scocchi una scintilla.

Per tale scintilla, da una all' altra armatura sarà passata una quantità di elettricità $Q = CV$ (§ 269), dove C è la capacità della bottiglia.

Facendo poi scoccare 2, 3.... scintille fra A e B, si avrà il passaggio di quantità di elettricità 2, 3.... volte maggiore della quantità portata da una scintilla sola.

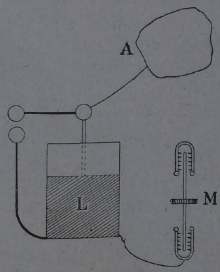


Fig. 244

Quest' apparecchio, che ci permette dunque di misurare, senza bisogno del cilindro di Faraday, la quantità di elettricità che passa in un conduttore, si chiama *bottiglia di Lane*. L' insieme s delle due sferette a distanza regolabile si chiama *spinterometro*.

Invece di una bottiglia, naturalmente, allo stesso scopo servirebbe un condensatore di qualsiasi forma.

Volendo dunque conoscere qual'è la quantità di elettricità che un conduttore *A* richiede, per elettrizzarsi fino a un dato potenziale, basterà caricarlo attraverso a una bottiglia di Lane *L*, secondo lo schema della figura 244, dove *M* rappresenta la macchina produttrice di elettricità, che studieremo in seguito.

Distribuzione dell' elettricità sui conduttori.

280 — In un conduttore carico di elettricità in equilibrio, il potenziale — come sappiamo (§ 259) — è uguale in tutti i punti, ma l'elettricità, generalmente, non è in esso uniformemente distribuita; giacchè, l'esperienza ci insegna che, a parità di superficie, l'elettricità non si trova in quantità uguali nelle varie regioni del conduttore.

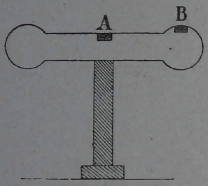


Fig. 245

Possiamo provare ciò facilmente mediante un conduttore di forma allungata — come quello della figura 245 — sorretto da un sostegno isolante; disponiamo sulla superficie di esso dei pezzi di stagnola *A*, *B*, uguali, e, dopo aver caricato il conduttore, portiamo questi pezzi di stagnola, successivamente, in un cilindro di Faraday comunicante con un elettroscopio. Vedremo allora che il pezzo di stagnola *A*, che si trovava nella regione mediana del conduttore, fa deviare poco l'elettroscopio, mentre quello *B*, che si trovava presso una estremità, lo fa deviare assai. Vuol dire che nella regione mediana l'elettricità è in quantità minore, a parità di superficie, che non nelle regioni estreme del conduttore.

A seconda della forma dei conduttori, varia la distribuzione dell'elettricità. Prendiamo, infatti, un conduttore flessibile costituito da una striscia di rete metallica, e appendiamo in diversi punti di esso tante striscioline di carta, che funzionino da elettroscopi (fig. 246).

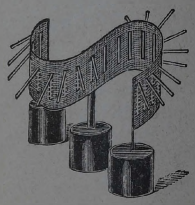


Fig. 246

Se carichiamo questo conduttore, vediamo che le foglie divergono molto in certi punti, poco in certi altri, e in qualche regione si mantengono immobili; e la distribuzione può essere assai variata, deformando il conduttore. Vediamo, in particolare, che le

striscioline di carta sulla porzione concava del conduttore, non si muovono o deviano poco dalla loro posizione verticale, mentre deviano assai quelle attaccate sulle regioni convesse, e tanto più quanto più è incurvata ivi la superficie.

281 — **Densità elettrica.** — Queste considerazioni mostrano l'opportunità di introdurre il concetto di *densità elettrica*.

Chiameremo *densità media superficiale* dell'elettricità in una regione, il *rapporto* $\frac{q}{s}$ *fra la quantità* q *di elettricità distribuita su quella regione, e la superficie* s *di questa*. E quando la superficie *s* è piccolissima, diremo che il rapporto $\frac{q}{s}$ indica la densità elettrica su un punto qualunque di *s*.

282 — **Tensione elettrica.** — L'esperienza dimostra inoltre che l'elettricità sui conduttori subisce delle *tensioni*, che cercano di spingerla fuori dai conduttori stessi. Se il conduttore è flessibile, allora esso cede alla sollecitazione di tali forze, e queste per tal guisa possono rendersi visibili.

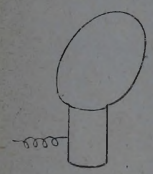


Fig. 247

Così, se si deposita una bolla di sapone sopra un tubo metallico (fig. 247) e poi si elettrizza il tubo, si vede che la bolla si allunga fino a staccarsi.

Tali tensioni si mostrano dirette sempre normalmente alla superficie dei conduttori, e sono più sensibili dove la densità è maggiore.

Macchine elettrostatiche.

283 — Per avere una produzione continua di elettricità, si usano le macchine elettriche. Si raccolgono in generale, in esse, sia l'elettricità positiva, sia quella negativa, che si generano sempre in quantità uguali, per la legge della conservazione dell'elettricità (§ 254). La prima va á disporsi sopra un conduttore, che prende il nome di *polo positivo*, e la seconda sopra un altro conduttore, detto *polo negativo*. Si stabilisce così, col funzionamento della macchina, una differenza di potenziale tra i due poli.

Rigorosamente parlando, una *macchina elettrica* non è un apparecchio *produttore* di elettricità, poichè sappiamo che non è possibile creare o distruggere una quantità qualsiasi di elettricità; quello che si può ottenere, con le macchine elettriche, è di stabilire fra due conduttori una differenza di potenziale più o meno grande, e di mantenerla, anche se ad essi vengano continuamente sottratte delle cariche elettriche. Quindi le macchine elettriche si sogliono anche chiamare, con linguaggio più proprio, *sorgenti di elettricità*, così come chiamiamo sorgente di calore qualunque sistema capace di innalzare e mantenere ad un livello costante la temperatura di un corpo.

Le pile (§ 250) sono sorgenti di elettricità; ma, come abbiamo visto, non si possono da esse ottenere che elettrizzazioni debolissime, tanto che occorre impiegarne un gran numero, riunite in serie, per aver notevoli effetti all'elettroscopio.

Le *macchine elettrostatiche*, invece, permettono di ottenere rapidamente delle cariche fortissime, e quindi dei potenziali molto elevati.

Il loro funzionamento è fondato essenzialmente sui due principî già da noi stabiliti:

1.° l'elettricità si porta esclusivamente alla superficie dei conduttori (§ 256);

2.° l'elettricità si disperde dalle punte (§ 267).

284 — Varie specie di macchine. — Le macchine elettrostatiche si dividono in due gruppi — cioè, in *macchine a strofinio* e *macchine a influenza* — secondo che vengono in esse utilizzati i fenomeni della elettrizzazione per strofinio o per influenza.

Notiamo però che questa divisione è piuttosto convenzionale, poichè il fenomeno d'influenza e la elettrizzazione per strofinio si utilizzano in entrambi i tipi.

Le macchine quasi esclusivamente oggi adoperate sono quelle ad influenza, tuttavia daremo anche un cenno della più nota tra le macchine a strofinio, quella di Ramsden.

285 — Macchina di Ramsden. — È costituita — come mostra la figura 248 — di un disco di vetro, VV, che si può far girare intorno ad un asse orizzontale per mezzo di una manovella m. Due coppie di cuscinetti, A, B, (generalmente di cuoio, imbottiti di crine e spalmati di bisolfuro di stagno) serrano leggermente il disco alle estremità del suo diametro verticale; essi

son tutti uniti fra loro metallicamente e sono messi — mediante la catenella *R* — in comunicazione col suolo. Alle estremità del diametro orizzontale il disco è invece abbracciato da due *pettini* metallici *C*, *D* uniti rispettivamente ai conduttori isolati *M*, *N*. Questi ultimi sono pure congiunti tra di loro, in modo da formare un conduttore unico *(collettore)*.

Quando si fa girare il disco, il vetro si elettrizza positivamente, per lo strofinio coi cuscinetti, mentre questi si elettrizzano negativamente: essendo i cuscinetti in comunicazione col suolo, l'elettricità negativa si disperde nella terra, e resta l'elettricità positiva sul vetro. Allora il vetro elettrizzato passa davanti ai pettini, e per influenza carica questi di elettricità negativa e il conduttore *MN* di elettricità positiva.

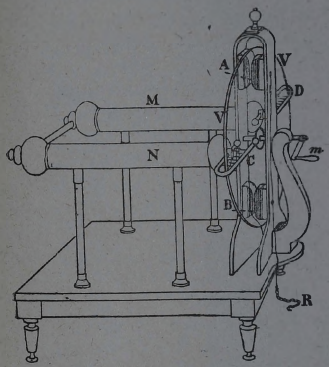


Fig. 248

L'elettricità negativa alla sua volta sfugge dai pettini, e neutralizza quella positiva del vetro; e così questo, tornato allo stato neutro, passa in mezzo all'altra coppia di cuscinetti, dove si elettrizza; e si ripetono gli stessi fenomeni di prima.

Se al conduttore *MN* si avvicina qualche corpo in comunicazione col suolo, si ha dall'uno all'altro un passaggio di elettricità che si manifesta con scoppiettanti scintille.

Va notato che i cuscinetti si possono anche collegare, invece che colla terra, con un conduttore isolato, che sarà così il polo negativo della macchina. Tanto dall'un polo che dall'altro possono allora trarsi scintille.

Se i due poli vengono avvicinati sufficientemente, le scintille scoccano invece fra di essi.

286 — Macchine ad influenza. Elettroforo. — Le macchine a influenza sono di vari tipi, ma tutte si fondano sopra il modo di funzionare della più semplice e più antica macchina del genere: l'*elettroforo di Volta*.

Esso consiste in una *schiacciata*, *SS*, di resina (fig. 249), e in un disco conduttore *DD*, munito di manico isolante, chiamato *scudo*. Questo può essere di metallo, o anche semplicemente di legno rivestito di stagnola.

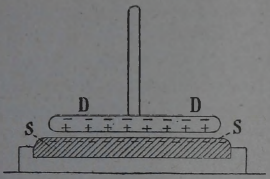


Fig. 249

Battendo con una pelle di gatto la schiacciata, questa si elettrizza negativamente. Se allora appoggiamo su di essa lo scudo e poi lo risolleviamo, sarà facile constatare che lo scudo stesso non si è elettrizzato in modo sensibile. Per la loro scabrosità, la resina e lo scudo si toccano soltanto in pochi punti: e quindi, essendo la resina un isolante, potrà passare, da essa allo scudo sovrapposto, soltanto quella minima quantità di elettricità (§ 241), che si trova nei punti di contatto.

Ma se, invece, mentre lo scudo è poggiato sulla schiacciata, tocchiamo con un dito la sua faccia superiore, e poi lo solleviamo, troveremo che esso è rimasto elettrizzato positivamente. Avviene, infatti, che lo scudo si elettrizza per influenza, positivamente sulla faccia che guarda la resina, e negativamente sulla faccia superiore. Toccando allora quest' ultima col dito, l' elettricità negativa si disperde nel suolo, e sullo scudo resta quella positiva, che si rende manifesta non appena si separi il disco dalla schiacciata.

L' operazione può ripetersi fin che si voglia, sempre con lo stesso risultato.

L' elettroforo, rigorosamente, non è una macchina elettrostatica completa, poichè ad esso mancano i poli e manca sopratutto un collettore; ma è facile completarlo con l' aggiunta di un cilindro di Faraday, o, più generalmente, con l' aggiunta di un conduttore qualunque. Così, basterebbe disporre, al disopra dell' elettroforo, due sfere *A*, *B* (fig. 250), poste rispettivamente in comunicazione con i due conduttori isolati *A'*, *B'*. Allora, facando toccare la sfera

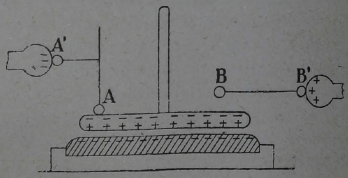


Fig. 250

A col piatto metallico quando questo è adagiato sulla schiacciata, e poi, sollevata la sfera A e quindi lo scudo, facendo toccare questo con la sfera B, si caricherebbe $A\ A'$ di elettricità negativa e $B\ B'$ di positiva. Ripetendo alternativamente tali operazioni, si aumenterebbero — in progressione aritmetica — le cariche di questi conduttori, che costituirebbero così i poli della macchina.

287 — Macchine a moltiplicazione di cariche. — Più interessanti e assai più adoperate sono le macchine ad influenza cosidette *moltiplicatrici*, nelle quali l' accrescimento delle cariche avviene secondo i termini di una progressione geometrica.

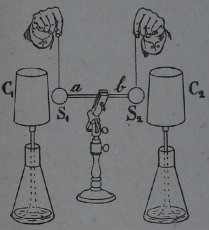


Fig. 251

Per intendere come ciò avvenga, prendiamo due cilindri di Faraday identici, C_1 e C_2 (fig. 251), il primo dei quali abbia ricevuta una carica negativa $-Q$, il secondo invece una carica positiva $+Q$.

Portiamo in presenza di questi cilindri rispettivamente due piccole sfere, S_1 ed S_2, che terremo sospese per mezzo di due fili isolanti, e che, per un istante, metteremo in comunicazione metallica tra di loro appoggiandole all'asticella ab, come mostra la figura. In queste condizioni S_1 ed S_2 si caricheranno per influenza, e precisamente S_1 assumerà una carica $+kQ$, ed S_2 una carica $-kQ$, indicando con k un coefficiente opportuno, positivo.

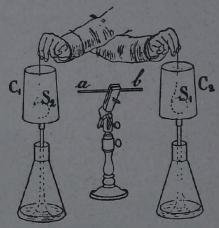


Fig. 252

Se ora noi introduciamo S_1 nel cilindro C_2 ed S_2 nel cilindro C_1 (fig. 252), facendo toccare ogni sfera con la parte interna del rispettivo cilindro, tutta la carica di S_1 passa in C_2, e tutta la carica di S_2 passa in C_1 (§ 256). Allora le cariche dei due cilindri saranno rispettivamente:

$$\text{carica di } C_1 = -Q - kQ = -Q\,(1 + k)$$
$$\text{carica di } C_2 = +Q + kQ = +Q\,(1 + k).$$

Lasciando i cilindri in queste condizioni, ripetiamo l' operazione indicata nella figura 251: allora

$$S_1 \text{ assumerà la carica } + kQ\,(1 + k)$$
$$S_2 \quad » \quad » \quad » \quad - kQ\,(1 + k).$$

E dopo una nuova immersione delle sfere nei cilindri, si avrà:

$$\text{carica di } C_1 = - Q\,(1 + k) - kQ\,(1 + k) = - Q\,(1 + k)^2$$
$$» \quad » \; C_2 = + Q\,(1 + k) + kQ\,(1 + k) = + Q\,(1 + k)^2.$$

Ripetendo ancora la doppia operazione, si otterrebbe analogamente:

$$\text{carica di } C_1 = - Q\,(1 + k)^3$$
$$» \quad » \; C_2 = + Q\,(1 + k)^3;$$

e così di seguito.

Si vede, dunque, che con questo procedimento le cariche dei due cilindri di Faraday crescono appunto come i termini di una progressione geometrica di ragione $1 + k$.

288 — Duplicatore del Belli. — Per rendere più rapida la produzione dell' elettricità secondo il procedimento schematico precedente, si sono costruiti diversi tipi di macchine, delle quali la più semplice è il *duplicatore del Belli*.

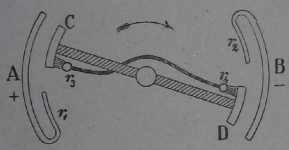


Fig. 253

Due segmenti cilindrici metallici A, B (rappresentati in sezione nella figura 253) forniti nella parte interna di due piccole molle pure metalliche r_1, r_2, sono retti da sostegni di vetro: essi rappresentano i conduttori C_1 C_2 della figura 251.

Le due palline S_1 S_2 di questa figura sono sostituite, nel duplicatore del Belli, colle lastrine C, D fissate alle estremità di un' asta isolante, imperniata sopra un asse intorno al quale può ruotare. Il conduttore ab della figura 251 è qui sostituito col conduttore $r_3 r_4$, munito all' estremità di spazzolini di filo metallico. Quest' ultimo conduttore è così disposto, da mettere in comunicazione fra loro C e D quando essi, ruotando nel senso della freccia, sono in posizione da non toccare più r_1 e r_2, pur restando affacciati ai conduttori A e B rispettivamente.

Consideriamo la macchina nella posizione indicata dalla figura. Diamo anzitutto ad A una piccolissima carica, per es. positiva, e supponiamo che tutto il resto del sistema non sia elettrizzato: allora, sotto l' influenza della debole carica positiva di A, si desta una debole carica negativa in C ed una positiva in D. La rotazione isola in seguito C e D, togliendoli dal contatto con r_3 e r_4; essi restano così elettrizzati e cedono poi le loro cariche opposte alle molle r_1 e r_2 quando — continuandosi la rotazione — vengono con esse a contatto.

Data la forma concava dei conduttori A e B, l' elettricità così comunicata loro per le molle si porta, come sappiamo (§ 256), all' esterno di essi; la carica positiva di A aumenta, e intanto B si carica negativamente.

Proseguendo la rotazione, si ripeterà il fenomeno di influenza, ma più intenso; e le cariche di A e B andranno così aumentando geometricamente (§ 287).

Sopra il medesimo principio del duplicatore del Belli sono fondate tutte le macchine ad influenza; di esse noi descriveremo la più usata: quella di Wimshurst.

289 — Macchina di Wimshurst. — Essa consta di due dischi di vetro uguali P, P' (fig. 254), paralleli, e girevoli intorno ad uno stesso asse, ma in senso inverso. Sopra ognuno di essi, sulle faccie che non si guardano, son fissati un gran numero di piccoli settori di stagnola, in rilievo, disposti radialmente in modo uniforme. Durante la rotazione, i settori diametralmente opposti su ogni disco si trovano successivamente riuniti, per un istante, dai conduttori diametrali m, n, muniti di pennellini metallici. Ed ognuno di questi conduttori diametrali è

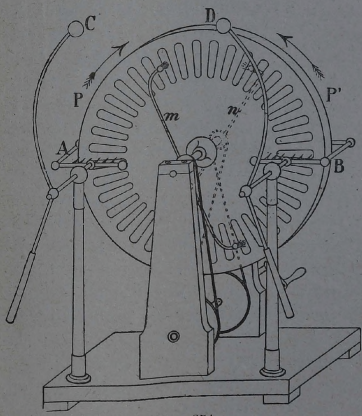
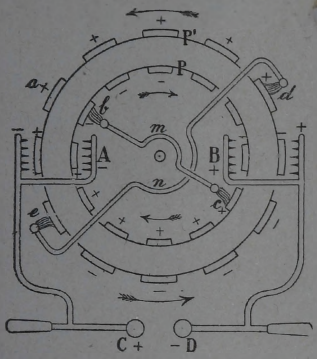


Fig. 254

inclinato di circa 15° sulla verticale, in senso contrario alla rotazione del disco corrispondente.

Infine, due pettini a ferro di cavallo, *A*, *B*, abbracciano insieme i due dischi alle estremità del diametro orizzontale, e sono rispettivamente collegati ai poli *C* e *D* della macchina.

Per intendere, ora, il funzionamento di questa macchina, noi supponiamo di sostituire dischi con due cilindri vuoti, coassiali *P*, *P'* (fig. 255) girevoli in senso contrario.



Flg. 255

I settori saranno qui rappresentati da striscie, pure di stagnola, — disegnate molto in rilievo nella figura — attaccate sui cilindri, lungo le generatrici, sulle pareti che non sono affacciate.

Comunichiamo ad una stagnola qualunque, *a*, di uno dei cilindri, una debolissima carica positiva, mentre tutto il resto dell'apparecchio si trova allo stato neutro. Per influenza, allora, si elettrizza il conduttore diametrale *m*, con una carica negativa sulla stagnola *b*, ed una positiva su *c*. Quando queste due stagnole del cilindro interno arrivano di fronte ai pennelli dell'altro conduttore diametrale, *n*, le stagnole esterne *d* ed *e*, in contatto con questi pennelli, si caricano per influenza, e, sereparandosi poi da essi nella rotazione, produrranno a lor volta — quando sian giunte di fronte al conduttore *m* — delle elettrizzazioni per influenza, sempre più intense, sulle stagnole interne.

Si vede quindi, che durante la rotazione tutte le stagnole superiori del cilindro interno si caricheranno negativamente, mentre tutte le stagnole inferiori dello stesso cilindro si caricheranno positivamente. Il contrario avviene pel cilindro esterno. E intanto, davanti alle punte del pettine *A* passano, in senso opposto, le stagnole dei due cilindri cariche positivamente; e davanti alle punte del pettine *B* passano invece quelle cariche negativamente. Sul primo pettine allora si desta per influenza la

elettricità negativa, mentre sul conduttore *C*, congiunto ad esso, si desta l'elettricità positiva; ma la prima sfugge dalle punte, mentre l'altra rimane su *C*, ch'è quindi il polo positivo della macchina. In modo analogo, il pettine *B* si elettrizza positivamente per influenza, mentre il conduttore *D*, ad essa congiunto, si elettrizza negativamente; quest' ultimo forma l' altro polo della macchina.

Elettricità di contatto.

290 — Abbiamo veduto (§ 259) che in un sistema conduttore, omogeneo e a temperatura uniforme, non può trovarsi l'elettricità in equilibrio, se non quando il sistema conduttore stesso è tutto a ugual potenziale.

Ora, l' esperienza insegna che questa legge cessa di valere, quando il sistema è formato da conduttori di specie diversa, o quando la temperatura non è uniforme.

Alessandro Volta scoperse, infatti, che facendo toccare insieme due metalli differenti, si stabiliva tra loro — per effetto del semplice contatto — una certa differenza di potenziale.

291 — **Elettroscopio condensatore.** — Per mettere questo fatto in evidenza, Volta costruì un apparecchio di squisita sensibilità, detto *elettroscopio condensatore*.

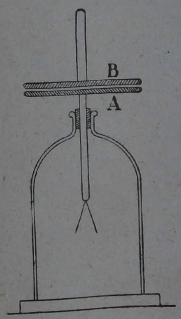


Fig. 256

È costituito, tale apparecchio, da un elettroscopio a foglie d'oro (fig. 256), la cui asta metallica sostiene un disco, *A*, di rame: a questo sta sovrapposto un altro disco, *B*, identico, munito di un manico. Le loro superficie affacciate sono ben piane, e verniciate con gommalacca: costituiscono dunque le armature di un condensatore.

Mediante questo apparecchio si posson facilmente mettere in evidenza le cariche elettriche fornite da una sorgente di elettricità (§ 283), che siano ad un potenziale così basso, da non esser capaci di far divergere le foglie di un elettroscopio ordinario.

In tal caso, infatti, — tenendo il disco *B* in comunicazione col suolo — colleghiamo *A* con quella sorgente. Le foglie ancora

non devieranno. Però — data la grande capacità posseduta ora dal disco *A* (§ 273) — per portar questo ad un potenziale anche assai basso, occorre somministrargli dalla sorgente una quantità notevole di elettricità. Dopo poco, interrotta la comunicazione di *A* colla sorgente, appena si alza il disco *B*, vediamo le foglie dell'elettroscopio divergere in modo sensibile.

E si capisce subito il perchè. Allontanando *B*, la capacità di *A* è diventata molto piccola, mentre la sua carica, attinta dalla sorgente, è rimasta tal quale: il suo potenziale dunque — come si ricava dalla formula (2) — si è per tal fatto molto innalzato, fino a far divergere le foglie.

292 — **Esperienze di Volta.** — Con questo semplice apparecchio Volta eseguì tre classiche esperienze, mediante le quali giunse a stabilire le sue *leggi del contatto*.

1.ª Prendiamo una laminetta di zinco *Zn* (fig. 257), saldata ad una laminetta di rame *Cu*; e tenendo in mano lo zinco, tocchiamo col rame il piatto inferiore dell'elettroscopio, mentre quello superiore è posto in comunicazione col suolo. Tolto poi il contatto, solleviamo il disco superiore: vedremo le foglie d'oro aprirsi, e potremo anche facilmente convincerci che si sono caricate ad un potenziale negativo.

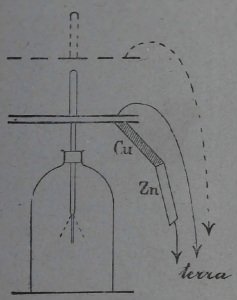


Fig 257

Questo dimostra che, pel semplice contatto, il rame si è elettrizzato negativamente, mentre lo zinco, che attraverso la nostra persona è in comunicazione col suolo, è a potenziale nullo. Dunque, il contatto dei due metalli ha destato in essi una certa differenza di potenziale.

2.ª Se ripetiamo l'esperienza reggendo la laminetta bimetallica per l'estremità opposta (rame), non osserveremo (fig. 258) alcuna deviazione nell'elettroscopio: dunque la differenza di potenziale (rame-zinco) generata per contatto fra il rame e lo zinco della lamina, è neutralizzata dalla differenza di potenziale contraria (zinco-rame) tra lo zinco della lamina e il rame di cui è fatto il disco dell'elettroscopio.

3.ª Ma se ora, tra lo zinco della laminetta ed il disco di rame, interponiamo un pezzetto di panno bagnato, vedremo (fig. 259) che l'elettroscopio si carica: ed ora positivamente.

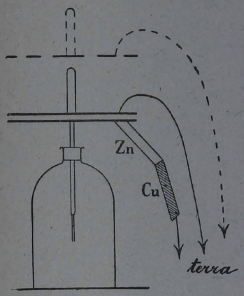


Fig. 258

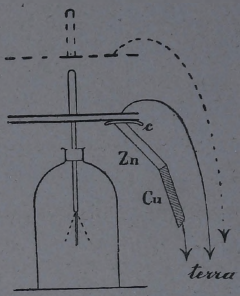


Fig. 259

Il che vuol dire, che il panno bagnato impedisce la creazione di una differenza di potenziale opposta a quella prodottasi nella laminetta bimetallica, pur mettendo lo zinco della lamina in buon contatto elettrico col piatto dell'elettroscopio condensatore. Il panno bagnato ha dunque solo l'ufficio di *conduttore*. Si avranno sivvero anche differenze di potenziale prodotte dai contatti rame-panno bagnato, e panno bagnato-zinco: ma esse sono, concluse il Volta, trascurabili di fronte a quella prodotta dal contatto zinco-rame.

Il Volta perciò distinse i conduttori in conduttori *di prima classe* (o perfetti elettromotori), come i metalli, e conduttori *di seconda classe* (o imperfetti elettromotori), come i liquidi.

Le forze elettromotrici che si destano per effetto del semplice contatto di due conduttori differenti, si chiamano *forze elettromotrici di contatto*.

293 — Leggi di Volta. — Da queste, e da molte altre esperienze, il fisico comasco dedusse importanti leggi, che portano il suo nome. Esse sono:

1.ª *Nel contatto di due metalli diversi o di due conduttori eterogenei qualunque, ad ugual temperatura, si stabilisce, tra di essi, una differenza di potenziale; essa non dipende che dalla natura dei due metalli, e dalla loro temperatura.*

2.ª *In una catena aperta di conduttori, la differenza di potenziale fra i due estremi non dipende che dalla natura di questi.*

3.ª *In una catena aperta di soli conduttori di 1ª classe, la differenza di potenziale fra i metalli estremi è uguale a quella che si avrebbe, se questi metalli estremi fossero in contatto immediato.*

Consideriamo ora una *catena* formata di metalli diversi saldati di seguito, e fissiamo lungo di essa un certo senso.

Allora attribuiremo alle varie forze elettromotrici di contatto il segno + o —, secondochè esse corrispondono ad un elevarsi o ad un abbassarsi del potenziale, percorrendo la catena nel senso prefissato.

Facendo la somma algebrica delle forze elettromotrici lungo la catena, otterremo ciò che si chiama la *forza elettromotrice risultante.*

Con queste convenzioni, possiamo allora enunciare nel modo seguente alcune importanti conseguenze che scaturiscono delle leggi di Volta:

1.ª *In una catena chiusa formata di soli metalli, tutti alla stessa temperatura, la forza elettromotrice risultante è nulla.*

2.ª *Detta forza elettromotrice risultante è pure nulla nel caso in cui la catena sia aperta, ma con gli estremi costituiti dal medesimo metallo.*

Infatti, in questo caso la f. e. m. risultante è quella che si avrebbe, se i due conduttori estremi fossero a contatto immediato: ma essi sono formati dello stesso metallo, e dunque tale f. e. m. risultante è nulla.

Termoelettricità.

294 — Dalle leggi di Volta risulta, che in una catena di conduttori di prima classe i cui estremi siano formati dello stesso metallo, la somma algebrica delle forze elettromotrici agenti è nulla, cioè i conduttori estremi sono allo stesso potenziale.

Ma ciò è vero soltanto, quando tutti i contatti, o tutte le saldature, dei conduttori di diversa natura, si trovino *ad una stessa temperatura.*

Quando invece tali saldature non siano tutte ad uguale temperatura — per es. quando se ne scaldi o se ne raffreddi una o più — i conduttori estremi assumono potenziali diversi.

Questo fatto è stato rilevato per la prima volta dal Seebeck.

Per dimostrarlo, prendiamo una catena aperta formata di due metalli alternati, rame e bismuto per esempio, saldati di seguito (fig. 260).

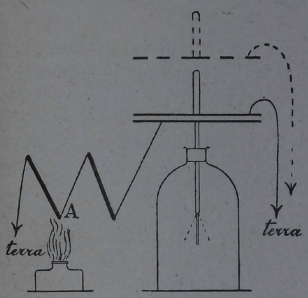


Fig. 260

Finchè tutte le saldature sono alla stessa temperatura, sarà facile constatare — per mezzo dell' elettroscopio condensatore (§ 291) — che i due metalli estremi della catena, formati ambedue da rame, sono allo stesso potenziale — come richiedono le leggi di Volta. Ma se scaldiamo una delle saldature, per esempio *A*, l' elettroscopio condensatore ci farà constatare subito che i due estremi stessi si trovano a potenziale diverso.

295 — Pile termoelettriche. — La variazione di temperatura delle saldature apparisce dunque essere la causa per cui si producono nuove forze elettromotrici, chiamate perciò *forze termoelettromotrici*. I fenomeni corrispondenti a queste forze si chiamano *termoelettrici*, e le catene di conduttori nei quali essi si producono, prendono il nome di *coppie o pile termoelettriche*.

In generale, il *senso di una forza elettromotrice* è quello del passaggio brusco dal conduttore a potenziale più basso verso quello a potenziale più alto. Ebbene, nel caso della coppia termoelettrica rame-bismuto, si trova che il potenziale del rame è più elevato che quello del bismuto, e quindi diremo che il *senso della forza termoelettromotrice* è diretto qui, nella saldatura che riscaldiamo, dal bismuto al rame. Si suol dire anche che il rame è *termoelettrico positivo* rispetto al bismuto; il bismuto allora è detto *negativo* rispetto al rame.

Le forze elettromotrici presentate dalle coppie termoelettriche sono sempre molto piccole. Quella della coppia bismuto-

antimonio, ad es., che pure è una delle più considerevoli, è di 0,000037 volta per ogni grado di cui s' innalzi la temperatura della saldatura. Per cui, come succede per le altre specie di pile (§ 262), così anche per le coppie termoelettriche, se vogliamo ottenere effetti molto più notevoli, occorre congiungere uno di seguito all' altro, ossia in serie (§ 262), diversi elementi. Si ha così una pila termoelettrica.

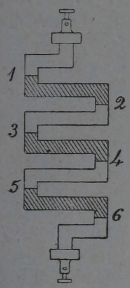


Fig. 261

La *pila Melloni* è formata da tante sbarrette di bismuto e di antimonio, ognuna delle quali ha le estremità piegate ad angolo retto. Si dispongono una a fianco dell'altra tali sbarrette (fig. 261), alternando i metalli, e saldando i due capi di ciascuna con un capo della precedente e un capo della susseguente. In questo modo tutte le saldature di ordine pari (2^a, 4^a, 6^a,...) si trovano da una parte, e tutte quelle di ordine dispari dall' altra, così che i due ordini di saldature si possono facilmente portare a due temperature diverse; le forze elettromotrici dei singoli elementi allora si sommano, e si può avere una forza elettromotrice risultante sensibile, anche con riscaldamenti debolissimi.

Sono state ideate varie specie di pile termoelettriche: ma esse hanno avuto nella pratica scarse applicazioni.

La corrente elettrica.

296 — Senso della corrente elettrica. — Se consideriamo un conduttore — o più conduttori collegati insieme — in cui sianvi punti a potenziale diverso, sappiamo che l' elettricità si muove dall' uno all' altro di questi punti. Tale movimento dell' elettricità prende il nome di *corrente elettrica*, e dura finchè si ha differenza di potenziale fra le diverse parti del conduttore considerato.

È evidente che, volendo fare lo studio di siffatto movimento elettrico, bisognerà fin d' ora stabilire il senso che è opportuno attribuirgli.

Osserviamo per questo, che tanto vale portare una certa quantità di elettricità positiva da un conduttore A a un altro B, quanto portare una quantità negativa, numericamente uguale

alla precedente, da *B* ad *A*. Ora, come *senso della corrente* lungo il conduttore, prenderemo *quello secondo il quale si muove l' elettricità positiva*, o quello secondo il quale l' elettricità positiva si muoverebbe per produrre gli stessi effetti che noi effettivamente osserviamo lungo il conduttore stesso.

Pertanto, avendo due conduttori carichi positivamente, se noi li connettiamo con un filo, si ha un passaggio di elettricità positiva dal conduttore a potenziale più elevato verso quello a potenziale più basso; e il senso di tal movimento ci dà il senso della corrente elettrica. Se i due conduttori, invece, sono entrambi carichi negativamente, connettendoli con un filo, si trova un aumento dell' elettricità negativa nel conduttore *A* a potenziale negativo più elevato (in senso algebrico), e una diminuzione dell' elettricità negativa nel conduttore *B* a potenziale negativo più basso. Questo effetto si otterrebbe, evidentemente, trasportando una certa quantità di elettricità positiva da *A* a *B*, e il senso di questo trasporto è da prendersi, quindi, come senso della corrente. Mettendo, infine, un conduttore positivo in comunicazione con uno negativo, si vedrà diminuire insieme la carica positiva del primo e quella negativa del secondo; ciò equivale ancora a portare una certa quantità di elettricità positiva dal primo al secondo, e questo fissa il senso della corrente elettrica.

Ora, si conviene di dire che i potenziali negativi son *più bassi* dei positivi, e tanto di più, quanto più grandi sono i loro valori assoluti.

In conseguenza, concluderemo che in tutti i casi *il senso della corrente in un conduttore è quello che va dai punti a potenziale più elevato verso quelli a potenziale gradatamente più basso.*

297 — Corrente elettrica della pila. — Uno dei modi più semplici e più facili per ottenere una corrente elettrica, che abbia una durata non troppo fugace, è quello di ricorrere ad una pila. Infatti, se congiungiamo con un filo metallico i due poli della pila, siccome questi *si mantengono* (§ 262) a potenziale diverso fra loro, si avrà dall' uno all' altro, attraverso il filo, un *continuo* passaggio di elettricità.

Per questa ragione i fili metallici costituenti i poli delle pile (§ 250) vengon detti *reofori*. Si suole poi dare il nome di *circuito* ad una serie di conduttori collegati fra loro in catena.

Ora, in una pila voltaica il polo o reoforo congiunto al rame ha un potenziale più alto che quello congiunto allo zinco: onde *chiudendo il circuito* si ha una corrente che va *dal rame allo zinco esternamente, ossia attraverso quella parte del circuito che è esterna alla pila.*

Effetti chimici della corrente.

298 — **Elettrolisi.** — Le corrente che percorre un circuito, produce, nelle varie parti di questo, effetti svariati, di cui ora imprenderemo lo studio. Comincieremo da quelli molto importanti che si osservano nelle soluzioni acquose di sali, di acidi, e di basi.

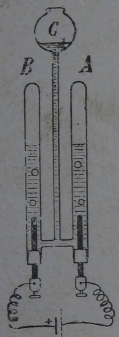


Fig. 262

Si prenda l'apparecchio rappresentato dalla figura 262, lo si riempia di una soluzione di acido cloridrico, e si faccia attraversare questa da una corrente elettrica, introducendo nella soluzione stessa due lamine di platino collegate con i poli di una pila. Si vedranno sulle due lamine svilupparsi delle bollicine gassose che andranno a raccogliersi in *A* e in *B*, e che sarebbe facile riconoscere per idrogeno e cloro: i componenti dell'acido cloridrico.

La stessa esperienza si può ripetere con la corrente di carica o di scarica di un condensatore; in questo modo però la quantità di acido decomposta è così piccola, che le bollicine gassose che si sviluppano sulle lamine non si vedono. Basta però operare sotto pressione minore dell'atmosferica per renderle visibili anche in tal caso.

È stato immaginato un apparecchio che si presta benissimo allo scopo (fig. 263). La corrente viene condotta in esso con due fili di platino p, p', che terminano sotto due campanelle a, b: queste son sorrette da un bastoncino di vetro, s, saldato in t. Riempite le campanelle di acqua acidulata, ed estratta l'aria dall'apparecchio mediante una macchina pneumatica, fino ad una pressione di circa 1 cm., esso è pronto a funzionare.

Facendo allora attraversare il liquido dalla corrente di carica o di scarica di un condensatore, si presenta in modo assai visibile, anche in tal caso, lo sviluppo di numerose bollicine di gas ai due fili di platino.

Il fenomeno di decomposizione ora descritto si chiama *elettrolisi*.

I liquidi che subiscono queste decomposizioni si chiamano *elettroliti*. I conduttori metallici che, immersi dentro il liquido, conducono la corrente, si chiamano *elettrodi*, e in particolare quello collegato col polo positivo si dice *anodo*, l'altro *catodo*. I prodotti poi della decomposizione si chiamano *joni*.

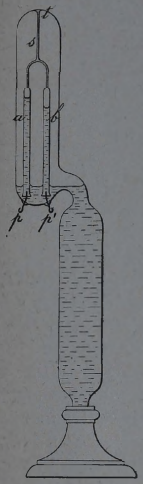


Fig. 263

Ora, l'esame attento del fenomeno dell'elettrolisi, dimostra che *le decomposizioni non appariscono che sulla superficie di contatto del liquido e degli elettrodi:* mai si osservano decomposizioni in seno alla massa liquida. Conformemente a ciò, quella parte che si libera all'anodo si chiama *anione*, *catione* l'altra.

Pel caso di sali o di basi, vale costantemente la regola che il *catione è sempre il metallo che entra nella composizione della molecola del soluto; l'anione è la parte rimanente.*

Pel caso degli acidi poi, fa da catione l'idrogeno, che essi tutti contengono. Così ad es., nel cloruro sodico ($Na\ Cl$) il catione è Na, mentre l'anione è Cl; nell'idrato potassico (KOH), il catione è K, l'anione è il gruppo OH; nell'acido solforico ($H_2\ SO_4$) il catione è H_2 e l'anione il gruppo SO_4.

299 — Reazioni secondarie. — Spesso i prodotti diretti dell'elettrolisi non appariscono agli elettrodi, giacchè si verificano delle *reazioni secondarie*, nelle quali intervengono gli joni, gli elettrodi e il solvente.

Per esempio, nell'elettrolisi di una soluzione acquosa di cloruro sodico, secondo la legge precedente si dovrebbe avere sviluppo di sodio al catodo: ma il sodio in presenza dell'acqua reagisce e forma idrato sodico, quindi, invece del sodio, si avrà, in condizioni ordinarie, l'idrato $NaOH$ — a meno che il sodio non possa reagire con l'elettrodo stesso, prima di essere a contatto con l'acqua. — Ciò succede appunto quando l'elettrodo negativo è costituito da mercurio: in tal caso il sodio si

amalgama col mercurio, dal quale può essere poi separato allo stato metallico mediante distillazione.

Se si fa passare la corrente in una soluzione di solfato potassico (K_2SO_4), per mezzo di due elettrodi di platino, si ha al catodo formazione di KOH e di idrogeno, secondo la reazione

$$K_2 + 2H_2O = 2KOH + H_2;$$

mentre il gruppo SO_4, all'anodo, reagisce con l'acqua, per formare H_2SO_4 e ossigeno, secondo l'altra reazione

$$SO_4 + H_2O = H_2SO_4 + O.$$

E che realmente, nella elettrolisi di una soluzione acquosa di K_2SO_4, si abbia la formazione di una base al catodo e di un acido all'anodo, si può dimostrarlo nella maniera seguente.

In un tubo ad U (fig. 264) mettiamo la soluzione di questo sale, con qualche goccia di tintura di tornasole neutra: poi facciamovi passare una corrente elettrica per mezzo di due elettrodi di platino. Dopo qualche minuto si vedrà il liquido tingersi di rosso presso l'anodo e di azzurro vicino al catodo, mentre vediamo su questo elettrodo svilupparsi idrogeno, e sull'altro ossigeno.

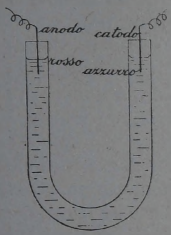


Fig. 264

Ed anche in molti altri casi le reazioni secondarie alterano e trasformano i prodotti diretti dell'elettrolisi. A causa di ciò, la deposizione dei metalli al catodo si potrà avere soltanto quando essi non reagiscono, nè coll'acqua della soluzione salina, nè coll'elettrodo.

300 — Elettrolisi dell'acqua. — Quando si fa l'elettrolisi di una soluzione di acido solforico, si produce, come sappiamo, la separazione dell'idrogeno dal gruppo SO_4. Quest'ultimo, in presenza dell'acqua, ripristina l'acido solforico e libera l'ossigeno. Sicchè, in ultima analisi, si ha a un elettrodo la liberazione di due atomi di idrogeno, nello stesso tempo che all'altro si ha la liberazione di un atomo di ossigeno; e si ottiene così la

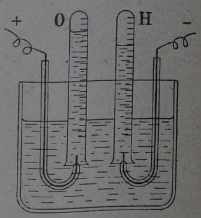


Fig. 265

decomposizione dell' acqua. Infatti, se poniamo due campanelle sopra i due elettrodi, in modo da raccogliere i gas sviluppati sugli elettrodi stessi, si trova che l' ossigeno occupa la metà del volume occupato dall' idrogeno (fig. 265). I due gas sono, dunque, nella proporzione in cui entrano a costituire l' acqua, e ciò giustifica la locuzione di *elettrolisi dell' acqua*, con la quale si designa il fenomeno ora descritto. Ma la locuzione — non bisogna dimenticarlo — non va presa nel senso letterale, perchè l' acqua non subisce direttamente l' elettrolisi.

301 — **Voltametri.** — Per poter studiare quantitativamente il fenomeno dell' elettrolisi, occorre misurare la quantità di sostanza decomposta dal passaggio della corrente. A tal uopo si usano apparecchi, detti *voltametri*, i quali permettono di raccogliere agli elettrodi i prodotti della decomposizione.

Allorchè questi prodotti sono gassosi, si forma il voltametro sovrapponendo agli elettrodi due campanelle di vetro, piene della stessa soluzione che si studia, come è rappresentato nella figura 266.

Anzi, siccome i prodotti della decomposizione stanno fra loro nei rapporti voluti dalla legge delle proporzioni definite, basta conoscere la quantità di uno di questi prodotti, oppure la loro quantità complessiva, per sapere qual' è la quantità di elettrolito decomposta. Per questo, una sola campanella è sufficiente per raccogliere i prodotti gassosi, come nell' apparecchio della figura 266 che raccoglie soltanto l'idrogeno, o come in quello della figura 267 che raccoglie la mescolanza tonante sviluppata dall' elettrolisi della soluzione di solfato potassico.

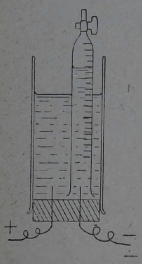


Fig. 266

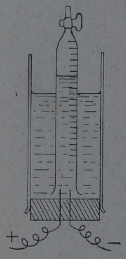


Fig. 276

Quando i prodotti che si liberano agli elettrodi sono solidi, allora la quantità di essi formatasi pel passaggio della corrente, si desume dall' aumento di peso che ha subìto uno degli elettrodi; per esempio, volendo studiare l' elettrolisi del nitrato d'argento ($AgNO_3$) si può dedurre la quantità di esso decomposta, dalla quantità d' argento depositata sul catodo. In

tal caso si costituisce il voltametro com'è indicato nella figura 268. La capsula d'argento *A* fa da anodo e nello stesso tempo contiene la soluzione; *B* rappresenta il catodo, ch'è pure d'argento, e che si pesa prima e dopo il passaggio della corrente.

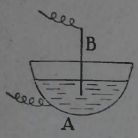


Fig. 268

Naturalmente, invece di prendere a considerare i prodotti che direttamente derivano dalla decomposizione della sostanza, si può tener conto dei prodotti secondari. Infatti anch' essi, come i primi, sono legati alla quantità di elettrolito decomposta, dalla legge delle proporzioni definite.

Leggi dell'elettrolisi.

302 — **Legge fondamentale.** — Misurando per tal guisa, mediante voltametri convenienti, le quantità di sostanza decomposte nell' elettrolisi, sono state trovate le leggi che regolano questo importantissimo fenomeno. Di esse è fondamentale la seguente :

La quantità di elettrolito decomposta per il passaggio della corrente elettrica, non dipende dalla concentrazione della soluzione, nè dalle sue condizioni fisiche, ma dipende unicamente dalla quantità di elettricità che ha attraversato la soluzione, ed è proporzionale a questa.

Possiamo dimostrare ciò agevolmente, adoperando un voltametro che contenga una soluzione di acido solforico (H_2SO_4).

Per far passare pel voltametro quantità determinate di elettricità, noi useremo il metodo della bottiglia di Lane (§ 279), disponendo le cose nel modo seguente.

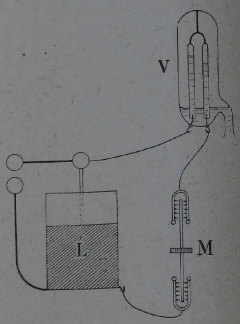


Fig. 269

Il voltametro *V* (fig. 269) ha un elettrodo in comunicazione con un polo di una macchina *M* di Wimshurst (§ 289), e l'altro elettrodo in comunicazione con un' armatura della bottiglia di

Lane *L*. L'altra armatura di questa è in comunicazione col rimanente polo della Wimshurst.

Se si fa agire la macchina elettrostatica, scoccano — a regolari intervalli di tempo — delle scintille fra le palline dello spinterometro della bottiglia di Lane. Per la produzione di ognuna di esse è necessario (§ 279) che sia passata una quantità costante di elettricità attraverso al voltametro, svolgendovi delle bollicine gassose che vanno ad occupare le sommità delle campanelle. Se una di queste è graduata, si potranno leggere su di essa i volumi del gas sviluppato.

Cominciamo intanto col mostrare che con un dato numero di scintille si svolge una quantità costante di gas, sia che le scintille si susseguano rapidamente oppure lentamente, sia che si adoperino fili di comunicazione lunghi o brevi, e qualunque sia la concentrazione e la temperatura della soluzione. Una uguale massa di gas si svilupperebbe anche con un voltametro di forma o di dimensioni diverse.

Osservato questo, facciamo scoccare un certo numero di scintille, servendoci di una bottiglia di Lane di una data capacità; e notiamo il volume di gas sviluppato in una delle campanelle. Se poi sostituiamo una bottiglia di capacità doppia e facciamo scoccare lo stesso numero di scintille, vediamo che il gas sviluppato ha ora un volume doppio. Con una bottiglia di Lane di capacità tripla si svolgerebbe un volume triplo di gas; e così via.

Siccome raddoppiando, triplicando, ecc. la capacità, si fa passare attraverso il voltametro, a parità di numero di scintille, una quantità di elettricità doppia, tripla, ecc. che nel primo caso, possiamo concludere che il gas sviluppato — e quindi la quantità di elettrolito decomposta — è proporzionale alla quantità di elettricità passata attraverso il voltametro.

303 — **Equivalenti elettrochimici.** — Ora, alla quantità di un elemento che viene liberata, nell'elettrolisi, pel passaggio di una quantità di elettricità uguale ad *1* coulomb, si è dato il nome di *equivalente elettrochimico* di quell'elemento.

Ecco gli equivalenti elettrochimici di qualcuno fra i più importanti elementi:

Idrogeno	0,01036	milligrammi
Rame	0,328	»
Argento	1,118	»
Oro	0,677	»

Nickel	0,304	milligrammi
Ferro (nei composti ferrosi)	0,290	»
Ferro (nei composti ferrici)	0,193	»

304 — Intensità di corrente. — In base alla legge fondamentale dell'elettrolisi, possiamo meglio precisare il concetto di corrente elettrica. Infatti, consideriamo in un conduttore una corrente che in tempi uguali sia capace di decomporre quantità uguali di un elettrolito: ciò significa che si hanno in tal caso passaggi di quantità uguali di elettricità in ciascuna unità di tempo. Si dice allora che quel conduttore è percorso da *corrente costante*.

Correnti costanti, per un certo tempo, si hanno in un conduttore che congiunga i poli di una pila.

Ora, la *quantità di elettricità che, in un conduttore percorso da corrente elettrica costante, attraversa la sezione del conduttore stesso nell'unità di tempo*, è una quantità caratteristica della corrrente stessa, e si chiama *intensità di corrente*. Essa si può misurare dalla quantità di elettrolito decomposta nell' unità di tempo, giacchè, per la legge fondamentale dell' elettrolisi, è a questa proporzionale.

Naturalmente l'*unità di intensità* — in conseguenza di ciò — apparterrà a quella corrente, per la quale nella sezione del conduttore passi *l'unità di quantità di elettricità per ogni minuto secondo*. Se come unità di quantità di elettricità si prende il coulomb, allora — sapendo che un coulomb può liberare in un voltametro ad argento 1,118 milligrammi di questo metallo — si conclude che l'intensità di corrente unitaria è rappresentata da quella corrente che è capace di liberare 1,118 milligr. di argento al minuto secondo.

Questa intensità unitaria si chiama *ampère*.

305 — Leggi di Faraday. — Lo studio completo poi dei fenomeni dell'elettrolisi è stato fatto dal Faraday, il quale ne ha dedotto importanti conseguenze anche pel regime delle correnti nei conduttori, riassumendo i suoi risultati in tre leggi, chiamate appunto le *leggi di Faraday*.

1.ª Legge. — Consideriamo una corrente che percorra un circuito unico. Lungo di questo, per es. nei tratti *AB*, *BC*, *CD* (fig. 270), intercaliamo diversi voltametri, contenenti soluzioni di uno stesso elettrolito, per es. di solfato potassico, e raccogliamo agli elettrodi l'ossigeno e l'idrogeno. Troveremo allora

che ognuno di questi gas si sviluppa in uguale abbondanza *in tutti i voltametri*. Ciò significa che *un'uguale quantità di elettricità attraversa nello stesso intervallo di tempo tutte le sezioni del circuito*. E questo equivale a dire (§ 304) che *l'intensità di corrente è la stessa in tutto il circuito*.

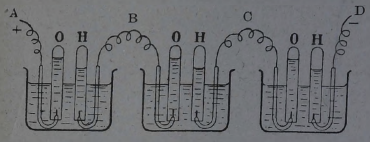


Fig. 270

Per questa prima legge di Faraday adunque, l'elettricità sembra muoversi, nel filo che costituisce il circuito, come si muoverebbe un fluido incompressibile in un tubo.

2ª *Legge*. — Si abbia un sistema conduttore, costituito da un filo *AB* (fig. 271), che giunto in *B* si divida in due rami, *BCE*, *BDE*, i quali poi si riuniscano in *E*, per proseguire nell'unico filo *EF*. I due tratti *BCE*, *BDE*, si dicono disposti *in derivazione*, e si chiamano *rami derivati*, mentre i tratti *AB*, *EF* formano il *ramo principale*.

Nei tre rami *AB*, *BCE*, *BDE* intercaliamo tre voltametri contenenti lo stesso elettrolito, per esempio acido solforico in soluzione nell'acqua. Portiamo poi *A* ad un potenziale più elevato di *F*, per modo che la corrente percorra questo sistema nel senso che va da *A* verso *F*.

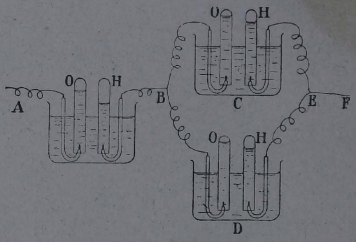


Fig. 271

Si osserva allora, che nei tre voltametri si sviluppa idrogeno e ossigeno, nel senso da indicare che la corrente nei due rami derivati va da *B* verso *E*, mentre nel ramo principale va da *A* verso *B*. Di più si vede, che ad ogni istante l'ossigeno e l'idrogeno sviluppati nel ramo principale, hanno ciascuno un volume uguale alla somma dei volumi del medesimo gas sviluppati negli altri due rami.

Ciò significa che l'intensità della corrente che percorre il ramo principale è la somma delle intensità delle correnti che percorrono i due rami derivati.

Più completamente possiamo dire, tenendo conto anche del senso, che *la corrente che va verso il punto di biforcazione, B, è uguale alla somma delle correnti che da questo punto si allontanano.*

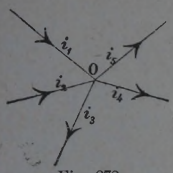


Fig. 272

Queste legge si applica qualunque sia il numero dei conduttori che concorrono in un punto.

Per esempio, se — come nella figura 272 — si avessero 5 conduttori concorrenti nel punto O e percorsi da correnti nel senso indicato dalle freccie, risulterebbe

$$i_1 + i_2 = i_3 + i_4 + i_5. \qquad (3)$$

3.ª Legge. — Poniamo in uno stesso circuito diversi voltametri (fig. 273) contenenti elettroliti differenti, per esempio acido cloridrico ($H\ Cl$), acido solforico ($H_2\ SO_4$), e ammoniaca (NH_3).

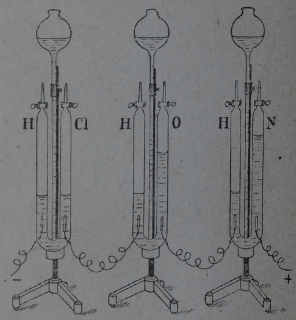


Fig. 273

Interrompiamo la corrente appena nel primo voltametro si è verificata la decomposizione di un grammo-molecola di acido cloridrico (ossia un numero di grammi di acido uguale al suo peso molecolare: quindi $1 + 35{,}5 = 36{,}5$ grammi).

Si troverà allora, che nel secondo voltametro si è avuta la decomposizione di mezzo grammo-molecola

$$\left(\text{ossia } \frac{2 + 32 + 4 \cdot 16}{2} = 49 \text{ gr.}\right)$$

di acido solforico, mentre nell' ultimo si è avuta la decomposizione di un terzo di grammo-molecola di ammoniaca

$$\left(\text{ossia } \frac{14 + 3}{3} = 5{,}6 \text{ gr.}\right).$$

Per la legge di Avogadro ciò equivale a dire che, mentre nel primo voltametro si ha sviluppo di un volume di cloro e di un volume di idrogeno, nel secondo si ha mezzo volume di ossigeno e un volume di idrogeno, e nell' ultimo si ha $\frac{1}{3}$ di volume di azoto e un volume di idrogeno.

Ora, *Cl* — che si unisce a un solo atomo di idrogeno — è *monovalente*, mentre il radicale SO_4 è bivalente, perchè fa unione con due atomi di idrogeno; per ragione analoga *N* è trivalente.

Ciò si può rappresentare colle formule di struttura

$$H—Cl \qquad \begin{matrix} H— \\ H— \end{matrix} SO_4 \qquad \begin{matrix} H— \\ H— \\ H— \end{matrix} N$$

intendendo con ogni sbarretta di indicare una valenza.

Quindi si può dire, che nella decomposizione elettrolitica di una molecola di *H Cl si rompe una valenza;* che se ne rompe *due* nella decomposizione di una molecola di $H_2 SO_4$, e se ne rompe *tre* nella decomposizione di una molecola di NH_3.

Mediante questo linguaggio, i risultati dell' esperienza precedente si esprimono dicendo che *in ogni voltametro è stato rotto lo stesso numero di valenze.*

La regola è generale, e può enunciarsi così: *Quando una stessa corrente attraversa parecchi elettroliti per uno stesso tempo, si ha in tutti la rottura di uno stesso numero di valenze.*

Intanto, abbiamo visto che un coulomb sviluppa 0,01036 milligrammi di idrogeno (§ 303); il che significa che occorrono $\frac{1000}{0{,}01036} = 96600$ coulomb per sviluppare 1000 milligrammi, ossia *1 grammo*, di idrogeno. Quindi lo stesso numero di coulomb sono necessari per sviluppare sia *un* grammo-molecola di qualunque elemento monovalente, come $^1/_2$ grammo-molecola di qualunque elemento bivalente, ecc.

In generale, *96600 coulomb rompono una valenza in qualunque elettrolito.*

Applicazioni dell' elettrolisi.

306 — **Separazione elettrolitica dei metalli.** — Per mezzo dell' elettrolisi, possiamo ottenere facilmente la separazione dei metalli dalle soluzioni dei loro sali.

Basta, a tal uopo, mettere in un voltametro la soluzione di un sale del metallo che si considera, e farla attraversare da una corrente elettrica. Il metallo allora — quando non reagisca con l'acqua — si deposita al catodo (§ 298).

Su tale processo è fondato un metodo semplice di purificazione dei metalli. Per fissare le idee, supponiamo di avere delle lamine di rame impuro: adoperiamole come anodo nell'elettrolisi di una soluzione di solfato di rame, mentre come catodo porremo una sottile lamina di rame puro. Avremo, al passaggio della corrente nel bagno, un deposito di rame puro — proveniente dalla soluzione — sul catodo. Ma per questo la soluzione non s'impoverisce, giacchè il gruppo SO_4, che si porta sul rame dell'anodo, reagisce con questo, e ripristina via via il solfato di rame che si decompone.

Talchè, in ultima analisi, si utilizza del rame impuro per avere solfato di rame, e simultaneamente si ha separazione di rame puro.

Nel caso poi che si vogliano separare dai loro sali i metalli alcalini puri — i quali reagiscono con l'acqua — la separazione si fa adoperando un catodo di mercurio. Allora si forma l'amalgama del metallo alcalino, dalla quale quest'ultimo può essere liberato mediante distillazione.

In tal modo, nel 1807, Davy per la prima volta ottenne il sodio e il potassio liberi da combinazione.

307 — Galvanostegia. — Un'importante industria, fondata sui processi elettrolitici, si occupa di ricoprire oggetti di metalli comuni con uno strato di un metallo nobile o dotato di particolare attitudini rispetto agli agenti esterni. Così, il ferro e l'acciaio, di cui sono costruiti i pezzi che debbono sopportare sforzi intensi, possono essere difesi dall'ossidazione mediante uno strato di zinco o di nichelio, depositato sulla loro superficie mediante l'elettrolisi. Oggetti di piombo o di volgari leghe possono assumere aspetti decorativi mediante doratura o argentatura.

Tutti questi rivestimenti si fanno immergendo gli oggetti dentro la soluzione di un sale del metallo che si vuol deporre, e collegandoli col polo negativo di una pila. Una lastra dello stesso metallo, connessa col polo positivo e immersa nella stessa soluzione, fa da anodo.

Affinchè il deposito resti bene aderente, è necessario che il pezzo sul quale esso si distende sia ben pulito, e che la corrente sia molto debole.

308 — **Galvanoplastica.** — Per mezzo dell' elettrolisi possono ottenersi anche fedelissime riproduzioni plastiche.

Per esempio, si tratti di riprodurre in rame una faccia di una moneta. Si fa di questa un calco in cera o in paraffina: esso costituisce la così detta *matrice*. Su di essa viene soffiata un po' di polvere di grafite per renderla conduttrice; e infine la si depone in *M* (fig. 274), sopra un disco di rame che appoggia sul fondo di una vaschetta contenente una soluzione di solfato di rame ($Cu\ SO_4$).

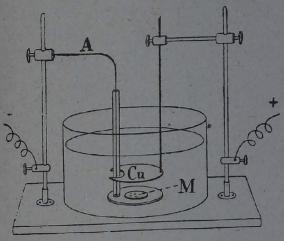


Fig. 274

La matrice e il disco di rame, congiunti col filo *A* al polo negativo d'una pila, fanno da catodo, mentre come anodo serve una lastrina *Cu* di rame. Una debole corrente determina un deposito di rame, che segue tutte le sinuosità della matrice, e che può diventare spesso quanto si desidera.

Dissociazione elettrolitica.

309 — Esaminato così il fenomeno dell'elettrolisi, e vedute alcune sue importanti applicazioni, cerchiamo di trovarne una spiegazione.

Per questo, Arrhenius ha proposto una ipotesi — detta della *dissociazione elettrolitica* — di cui le conseguenze sono in perfetto accordo con l' esperienza. Secondo questa ipotesi, la molecola di un composto è formata di due gruppi atomici distinti, carichi di quantità di elettricità uguali e contrarie, e tenuti avvinti dalla loro mutua attrazione. Questi gruppi si chiamano *ioni*, e possono, in certe condizioni, venire separati tra loro. Così, ad es., facendo una soluzione diluita di solfato di rame ($CuSO_4$) nell' acqua, la molecola del solfato di rame si scinde in due parti: *Cu* (ione positivo), e SO_4 (ione negativo).

In generale, ogni volta che si forma una soluzione diluita di un composto, alcune sue molecole *si dissociano*, vale a dire si scindono nei loro *ioni*. E quindi, non appena si immergano nella soluzione due conduttori comunicanti coi due poli di una pila, tutti gli ioni positivi e negativi, che prima

vagavano a caso per la soluzione, vengono attratti rispettivamente verso il catodo e verso l'anodo; colà giunti, cedono agli elettrodi le loro cariche, e si liberano, a meno che non reagiscano chimicamente con essi.

In questo modo, il passaggio dell' elettricità attraverso ad una soluzione è da considerarsi come un fenomeno di convezione: sciami di ioni positivi e negativi, muovendosi nel liquido, effettuano il trasporto — da un elettrodo all' altro — delle cariche elettriche fornite e rinnovate perennemente dalla pila.

Nell' esempio citato del solfato di rame, la molecola $CuSO_4$ si scinde, allorchè è disciolta in acqua, nei gruppi Cu e SO_4. L' ione positivo Cu migra verso il catodo, dove, ceduta la sua carica, si deposita sotto forma di rame metallico; l' ione negativo SO_4 migra verso l' anodo, e cedendogli la sua carica reagisce coll' acqua, formando H_2SO_4 e liberando ossigeno; oppure, se l' anodo è di rame, reagisce con esso formando di nuovo solfato di rame.

Teoria della pila.

310 — I fenomeni elettrolitici di cui ci siamo finora occupati, si verificano anche nel liquido delle pile, e influiscono sul valore della forza elettromotrice.

Vediamo anzitutto quale sia la causa che dà origine alla differenza di potenziale fra i poli di una pila.

Varie sono le spiegazioni che sono state immaginate. Volta riteneva — in base alla sua *teoria del contatto* — che tale causa risiedesse nella saldatura dello zinco della pila col rame del reoforo; egli infatti dimostrò — come già sappiamo (§ 292) — che al contatto di due metalli diversi si sviluppa una forza elettromotrice. Così, nel caso della pila stessa, si ha una brusca discesa di potenziale dalla lamina di zinco al reoforo di rame, che le è saldato; ma fra lo zinco e la lastra di rame, che son separati dal liquido, non si ha nessuna differenza di potenziale, cosicchè — come già dicemmo (§ 297) — il polo della pila che ha potenziale più alto è quello congiunto alla lastra di rame. Molti fisici, anche oggigiorno, sono di questo parere.

Molti altri ritengono che la f. e. m. abbia sede invece nel contatto fra zinco ed acqua acidulata, e precisamente sia dovuta alla reazione chimica che ivi si produce. È noto a tutti che lo zinco reagisce coll'acido solforico in conformità dell'equazione:

$$Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2;$$

secondo la *teoria chimica della pila* si può dunque pensare che a causa di questa reazione lo zinco si mantenga ad un potenziale più basso di quello della soluzione. Anche in tale ipotesi la lamina di rame e il suo reoforo si trovano al potenziale stesso del liquido.

Probabilmente ambedue le cause accennate intervengono nel funzionamento della pila; ma sembra tuttavia doversi attribuire all' affinità chimica tra le sostanze che costituiscono la pila, la parte preponderante nel dare origine alla forza elettromotrice. Anzi, basandosi unicamente sulle relazioni quantitative tra l'energia chimica delle reazioni che hanno luogo nelle pile, e le manifestazioni di vario genere, che — come vedremo — si palesano lungo il circuito, ha potuto Helmholtz stabilire una *teoria termodinamica della pila*, che fornisce dei risultati numerici concordanti con quelli ricavati dalle misure.

Più recentemente Nernst ha sviluppato — in base a nuove ipotesi — una *teoria osmotica della pila*, che conduce pure a conseguenze notevoli confermate dall' esperienza.

Ma su queste varie teorie, per quanto molto attraenti, non possiamo qui trattenerci. Invece dobbiamo far notare che per convenzione si usa chiamare *elettrodo positivo* di una pila quello a cui è congiunto il polo positivo (§ 297): ed *elettrodo negativo* l' altro.

Polarizzazione.

311 — La corrente elettrica che percorre il circuito di una pila deve produrre anche in questa — come in qualunque voltametro inserito nel circuito medesimo — dei fenomeni elettrolitici. Così, nella pila voltaica, la corrente che nel circuito esterno va dal rame allo zinco, passerà nella soluzione di acido solforico dallo zinco al rame, e decomporrà l' acido nei suoi ioni H_2 e SO_4. L' ione SO_4 si porterà sull' anodo di zinco, col quale formerà solfato di zinco ($Zn\ SO_4$), e l' idrogeno si libererà sopra il catodo di rame. L' idrogeno però, prima di svolgersi in bollicine, permane alquanto sulla superficie del rame, alterandola in guisa da generare, al suo contatto coll' acido, una nuova f. e. m., detta *forza elettromotrice di polarizzazione:* essa è di senso contrario a quella originaria della pila, e quindi ha per effetto di ridurre più debole la forza elettromotrice risultante. Ciò comincia ad avvenire dopo poco tempo

dacchè si è chiuso il circuito, e si rivela come una rapida e notevole diminuzione dell'intensità della corrente.

Ci convinciamo di tutto ciò colla seguente esperienza.

Prendiamo una pila *P* di Volta (fig. 275), e mediante i fili *m*, *n*, mettiamone i poli in comunicazione colle due coppie di quadranti di un elettrometro (§ 247): l'ago — che era stato prima caricato — subirà una certa deviazione.

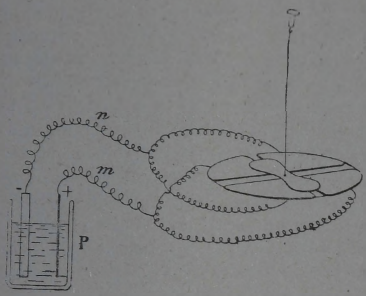


Fig. 275

Poi stacchiamo i fili *m*, *n* dall'elettrometro e congiungiamoli direttamente fra loro; con che chiudiamo il circuito e diamo luogo così al passaggio della corrente. Se allora, *dopo qualche tempo*, riapriamo il circuito, e ricolleghiamo i poli della pila coi quadranti dell'elettrometro, si ottiene una deviazione dell'ago molto minore; ossia la differenza di potenziale tra i poli è divenuta più piccola. Si dice che la pila è *polarizzata*.

312 — Pile a depolarizzante. — Onde evitare l'inconveniente della polarizzazione, è necessario impedire in qualche modo il depositarsi dell'idrogeno sull'elettrodo positivo della pila.

Si è pensato a tal uopo di interporre sul cammino degli ioni H_2 opportune sostanze (dette perciò *depolarizzanti*), capaci di trattenerli, impegnandoli in qualche reazione chimica. E le pile usate nella pratica sono appunto tutte *pile a depolarizzante*.

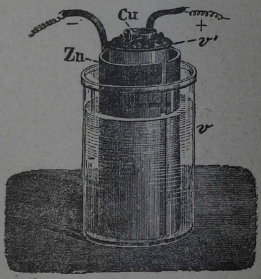


Fig. 276

Fra le più usate è la *pila Daniell*. È costituita da un vaso *v* di vetro (fig. 276), contenente una lastra di zinco *Zn* (elettrodo negativo) ed una soluzione di acido solforico al 10 %.

Dentro al vaso v è collocato un secondo vaso v', concentrico al primo, di porcellana non verniciata, in modo che per la sua porosità si imbeve di liquido e diventa buon conduttore: esso contiene una soluzione concentrata di solfato di rame, ed una lastra di rame Cu (elettrodo positivo).

Lo zinco rimane attaccato dall' acido, formando solfato di zinco e idrogeno: ma quest' ultimo nell' attraversare la soluzione di solfato di rame reagisce con esso, secondo la equazione

$$H_2 + Cu\,SO_4 = Cu + H_2\,SO_4. \qquad (\alpha)$$

Così l' acido solforico si ripristina dentro al vaso poroso, ed il rame metallico, depositandosi sull' elettrodo positivo, fa aumentare questo di spessore.

Durante il funzionamento della pila — come si vede dall' equazione (α) — la soluzione di solfato di rame si impoverisce: per conservarla concentrata si suole tener sospesi nella soluzione, entro un apposito cestello, dei cristalli di solfato di rame, i quali si sciolgono a poco a poco.

La corrente che si ottiene colla pila Daniell non è intensa, ma è molto costante.

Un' altra pila molto usata è la *Grenet*. È costituita da un vaso di vetro, a cui si dà per lo più la forma di bottiglia a largo collo (fig. 277): esso contiene dell' acqua acidulata con acido solforico, mescolata con una soluzione di bicromato di potassa, la quale agisce da depolarizzante. In questo liquido pesca permanentemente l' elettrodo positivo, formato da due lastre di carbone di storta C, C (di quello che si produce nella distillazione del gas illuminante), assai vicine fra loro: invece l' elettrodo negativo Z, di zinco, è sostenuto da un' asticella metallica, a, e si immerge solo al momento in cui usiamo la pila. Esso viene allora a collocarsi a pochissima distanza dai carboni in mezzo ad essi.

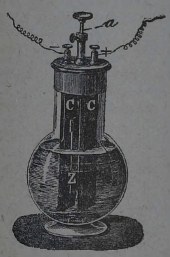


Fig. 277

Questa pila è comodissima quando si richiedano correnti intense, di breve durata.

Una terza pila, infine, molto adoperata per gli usi domestici, è la *Leclanché* (fig. 278). Anch' essa, come la Daniell, è formata con due vasi concentrici: uno esterno v, di vetro, l' altro

interno v', di porcellana porosa. Il primo contiene una soluzione di sale ammoniaco (HN_4Cl), in cui pesca l'elettrodo negativo, Zn, di zinco; l'altro contiene l'elettrodo positivo C, di carbone di storta, contornato di pezzetti di biossido di manganese.

Fig. 278

In questa pila l'idrogeno, quando non si produce troppo rapidamente, viene impiegato nella riduzione del biossido di manganese. Però, perchè tale riduzione si compia, occorre un certo tempo, e quindi una pila di questo genere può servire solo quando si desiderino correnti deboli, e per brevi intervalli, come ad es. per i campanelli elettrici e per i telefoni.

Accumulatori.

313 — Il fenomeno della polarizzazione, così dannoso pel funzionamento di una pila, si utilizza invece con grande vantaggio per accumulare, con appositi apparecchi, notevoli quantità di energia, e ottenere poi correnti elettriche più comodamente che colle pile.

Questi apparecchi si chiamano *accumulatori*.

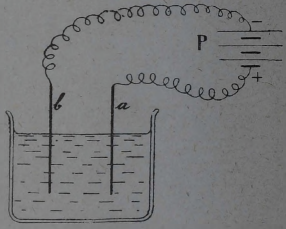


Fig. 279

Per intender bene il loro funzionamento, facciamo una esperienza. Chiudiamo per un po' di tempo il circuito di una pila P (fig. 279) attraverso un voltametro ad acqua acidulata, con elettrodi a, b di piombo. L'ossigeno si svilupperà su a e produrrà biossido di piombo; invece l'idrogeno che si deposita su b, dà origine presto al fenomeno della polarizzazione (§ 311). Di ciò possiamo subito assicurarci: infatti tolta la comunicazione delle lamine a e b coi poli della pila, colleghiamole invece colle due coppie di quadranti dell'elettrometro, di cui l'ago sia già stato caricato. Si nota una deviazione, che dimostra l'esistenza di una differenza di potenziale fra le due lamine: è questa la f. e. m. di polarizzazione.

In questa esperienza si riconosce che la lamina *a*, la quale era stata prima congiunta al polo positivo della pila, si trova ad un potenziale più elevato che l'altra lamina: il voltametro si è *polarizzato*. Se dunque uniamo con un filo metallico i due elettrodi di questo voltametro, otteniamo ora una corrente elettrica che va, nell'interno della soluzione, da *b* verso *a*, cioè in senso contrario di quella che originariamente vi inviava la pila *P*.

Ora, però, l'idrogeno che si svolge su *a* riduce di nuovo il biossido di piombo a piombo metallico, e l'ossigeno, liberandosi su *b*, reagisce coll'idrogeno che vi trova, formando acqua: in tal modo il voltametro si depolarizza e la corrente a poco a poco cessa.

Un apparecchio siffatto può dunque accumulare l'energia fornitagli da una corrente elettrica che l'attraversi, e spenderla dipoi nella produzione di una nuova corrente: e perciò lo si chiama *accumulatore*.

La corrente colla quale si fornisce all'accumulatore questa energia si dice *corrente di carica*, quella che poi se ne ottiene si chiama invece *corrente di scarica*. E si dà il nome di *capacità dell'accumulatore* alla *quantità complessiva di elettricità che l'accumulatore può restituire nella scarica*. Essa si accresce moltissimo aumentando la superficie degli elettrodi. A tale scopo ciascun elettrodo è costituito da parecchie lastre parallele, riunite fra loro da un regoletto di piombo, come mostra in pianta la figura 280. Le lastre che costituiscono un elettrodo si alternano, senza toccarle, colle lastre dell'altro.

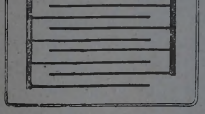


Fig. 280

Un artificio molto vantaggioso, per dare poi al piombo d'ogni lastra una superficie molto estesa, è quello di renderlo spugnoso. Si riesce a ciò con una serie prolungata di cariche e scariche, in senso alternativamente opposto, cui si sottopone l'accumulatore per la sua *formazione*. In tal modo le lastre dell'elettrodo positivo nella carica si ricoprono a poco a poco di biossido di piombo; quando poi la corrente circola in senso inverso, resta allora sulle lastre uno strato di piombo spugnoso.

Però con questo metodo, dovuto a Planté, occorre parecchio tempo per la formazione. Il processo invece oggigiorno vien molto abbreviato, in grazia di una speciale costruzione delle lastre; le quali sono formate, a tale scopo, di piombo reso alquanto più duro coll' aggiunta di antimonio, ed alle quali si

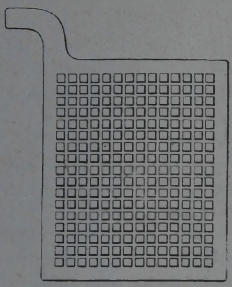


Fig. 281

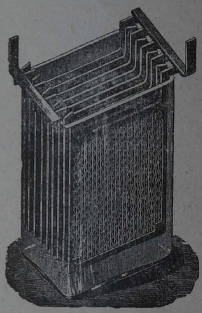


Fig. 282

dà, mediante appositi stampi, la forma di un graticolato (fig. 281). I fori del graticolato si riempiono con una pasta a base di litargirio per l' elettrodo negativo, e a base di minio pel positivo.

Allora la prima corrente di carica riduce il litargirio in piombo metallico spugnoso, e fornisce ossigeno al minio trasformandolo in biossido di piombo; così più in breve e con minore spesa si formano gli *strati attivi* sugli elettrodi. La figura 282 mostra un accumulatore pronto al funzionamento.

Perchè gli accumulatori possano prestare buoni servigi e per lungo tempo, conviene osservare, nell' usarli, norme speciali. La corrente di carica non deve superare una certa intensità, ed è inutile prolungarne la durata, da quando i gas cominciano a svolgersi liberamente: l' accumulatore allora ha la f. e. m. di circa 2,6 volta. La scarica poi non deve essere mai completa, arrestandosi quando la f. e. m. sia scesa a 1,8 volta.

Gli accumulatori hanno finora il difetto di avere un peso notevole: ma richiedono poca manutenzione, e sono molto comodi in alcuni casi, quando occorrano correnti molto costanti.

Oltre agli effetti elettrolitici, di cui or ora abbiamo trattato, la corrente produce pure altri effetti importanti, e cioè effetti magnetici ed effetti termici. Per studiare gli effetti magnetici è necessario innanzi un breve cenno sul Magnetismo in generale.

Magnetismo.

314 — Magneti permanenti. — Si trovano in alcune miniere di ferro campioni di un ossido di ferro ($Fe_3 O_4$), conosciuto dai mineralogisti sotto il nome di *magnetite*, e dotato della proprietà di attirare il ferro, l'acciaio, la ghisa, ecc. Questi campioni sono detti *calamite*, o *magneti*, *naturali*.

Se s'immerge un magnete naturale fra la limatura di ferro, questa aderisce alla superficie del magnete; senonchè si riscontrano sulla superficie di ogni magnete alcune regioni speciali ove la limatura aderisce in maggior quantità, formando ciuffi caratteristici come mostra la figura 283.

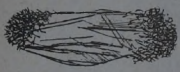
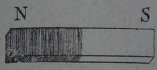


Fig. 283

A queste regioni, in cui il fenomeno dell'attrazione si verifica più marcatamente, si dà il nome di *poli* del magnete naturale.

Strofinando sopra uno dei poli una verga di acciaio temperato, ad esempio un grosso ago da calza, si riscontra che l'ago acquista anch'esso la proprietà di attrarre pezzetti di ferro o limatura. Potremo poi verificare che anche nell'ago d'acciaio si sono formati due poli, i quali — se, come di solito, lo strofinamento è fatto nel senso della lunghezza — si trovano alle due estremità dell'ago. L'ago così preparato dicesi *magnete artificiale permanente*.

315 — Magneti temporanei. — Però, mentre un magnete di acciaio conserva indefinitamente le sue proprietà, non tutti i magneti fanno altrettanto. Fra i vari materiali magnetici ve n'è uno, il ferro dolce, che presenta le proprietà magnetiche solo temporaneamente.



Avviciniamo, infatti, uno dei poli di un forte magnete permanente $N S$ ad una delle estremità di un cilindretto di ferro dolce $A B$ (fig. 284), di cui tufferemo l'altra estremità nella limatura. Vedremo tosto formarsi il ciuffetto caratteristico, che mostra come all'estremo del cilindro di ferro sia comparso un polo magnetico. Un ugual ciuffo si ottiene anche all'altra estremità di A B vicina al magnete $N S$, quando le

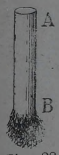


Fig. 284

si accosti opportunamente della limatura; dunque il cilindretto presenta due poli, come un vero e proprio magnete. Ma allontanando il magnete *NS*, la limatura si stacca dal cilindro di ferro dolce, cioè i due poli spariscono. Perciò un pezzo di ferro dolce, che presenti le proprietà magnetiche, si dice *magnete temporaneo*.

316 — Magnetismo residuo. — Tuttavia il ferro, quale comunemente viene usato, non perde istantaneamente, e del tutto, le proprietà magnetiche; mantiene ancora — si suol dire — un po' di *magnetismo residuo*. Ciò, del resto, dipende solo dalle sostanze estranee che esso contiene, ed anche dalle sue condizioni di assettamento molecolare. Infatti, ricuocendo il ferro parecchie volte, si trova che il *ferro dolce* così trattato abbandona quasi del tutto il magnetismo provocato prima in esso dalla vicinanza di una calamita permanente. Per altra parte, quanto più il ferro viene *rincrudito*, tanto più tende a comportarsi come l' acciaio.

Poli magnetici.

317 — Polo nord e polo sud. — Tutti quanti i magneti poi — temporanei o permanenti essi siano — hanno a comune una proprietà fondamentale: cioè che *in ogni magnete si presentano almeno due poli, e non vi è alcun magnete ove esista un polo solamente.* Noi ci limiteremo sempre ad esaminare il caso più semplice e più comune, che si ha quando i poli sono due.

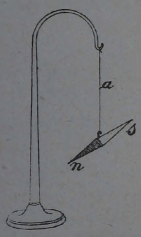


Fig. 285

Intanto potremo subito mostrare un altro fatto importante: che, cioè, i due poli di un magnete non sono identici.

Sospendiamo, infatti, per il suo centro, un aghetto di acciaio magnetizzato *s n* (fig. 285) ad un filo di seta *a*, che non abbia torsione sensibile: noteremo che l' ago non si dispone comunque, ma assume una direzione ben determinata.

Se, spostando convenientemente il punto per cui l' ago è sospeso al filo, rendiamo l' ago orizzontale, constateremo che la direzione assunta definitivamente dall' ago è prossima alla direzione del meridiano geografico, purchè in vicinanza dell' ago non si trovino masse di ferro o altri magneti.

Se si fa rotare l' ago di 180°, volgendo al nord l' estremità che prima si dirigeva al sud, vediamo che l' ago, appena lasciato libero, gira, in un senso o nell' altro, di altri 180°, in modo da ricondurre i poli nella posizione primitiva.

I poli non hanno adunque *proprietà identiche.*

Noi chiameremo *polo nord* quello che si volge verso il nord della Terra, e *polo sud* il polo contrario.

Prendiamo poi un altro magnete, di cui previamente si siano contrassegnati il polo nord e il polo sud — tingendo, ad es., il primo di turchino e l' altro di rosso —; avviciniamo uno dei poli *S* (fig. 286) di questo magnete all' uno o all' altro dei poli dell' ago sospeso. Noteremo una repulsione o un' attrazione, secondo che i poli resi vicini sono dello stesso nome o di nome contrario.

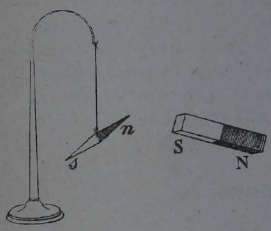


Fig. 286

Quindi *i poli dello stesso nome si respingono, e si attraggono invece quelli di nome contrario.*

È facile dunque, dato un magnete qualsiasi, riconoscere qual' è il nome che compete ad uno de' suoi poli, quando si disponga di un ago sospeso come quello che ci ha servito per l' esperienza precedente. Basta cercare quale polo dell' ago venga respinto dal polo del magnete in esame: si sa allora che il secondo ha lo stesso nome del primo.

318 — **Esperienza della calamita spezzata.** — Le proprietà magnetiche non sono soltanto inerenti alle regioni dei poli, come potrebbe credersi dalle esperienze fin qui fatte. Magnetizziamo, infatti, un lungo ago di acciaio temperato, procurando che esso presenti un unico polo nord e un unico polo sud, alle estremità. La limatura di ferro non aderirà allora al centro dell' ago.

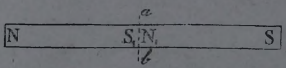


Fig. 287

Rompiamo l' ago in due: è facile verificare che i due pezzi sono anch' essi due magneti, ciascuno dei quali presenta regolarmente i suoi due poli di nome contrario, situati alle estremità.

Da una parte e dall' altra della frattura *a b* (fig. 287) sono comparsi due poli S_1 e N_1 di nome contrario rispettivamente ai poli N ed S.

Noi potremmo ripetere di nuovo l' esperienza, spezzando i magneti NS_1 e N_1S e continuare poi ancora indefinitamente, e troveremmo sempre che, per quanto piccoli siano i pezzetti ottenuti, questi sono pure magneti, coi loro poli alle estremità.

Inversamente, riuniamo per la frattura *a b* i due pezzi NS_1 ed N_1S, e tuffiamo tutto nella limatura di ferro; i poli N_1, S_1 sembrano essere spariti, e la limatura non aderisce che alle estremità N, S.

È semplice rendersi conto di questo fenomeno. Infatti, in generale, un pezzetto di limatura, in vicinanza di un polo magnetico, viene attirato perchè si magnetizza, temporaneamente, esso pure, precisamente come il cilindretto di ferro dolce del § 315. Il nome dei suoi poli dipende da quello del polo più vicino di cui il granello trovasi in presenza.

Ma nel caso nostro tanto il polo N_1 che quello S_1 di nome contrario, si trovano egualmente situati rispetto al granello di limatura. Le azioni che essi esercitano sul granello sono perciò uguali ed opposte l' una all' altra, e nessuna attrazione o repulsione si verifica.

Poichè i due poli N_1 e S_1, posti vicinissimi, annullano a vicenda l' uno l' azione dell' altro, diremo che sono *uguali ma di nome contrario*.

319 — Legge di Coulomb. — L' esperienza precedente della calamita spezzata dimostra che ogni più piccola parte di un magnete — anche situata nell' interno — si trova in uno stato speciale, che dicesi appunto *stato magnetico*. Tuttavia nello studio delle mutue azioni fra magneti possiamo limitare le nostre considerazioni ai poli.

Ora, ogni magnete presenta almeno due poli; perciò è impossibile studiare con esperienze assolutamente rigorose l' azione di un polo *isolato* su di un altro polo pure *isolato*. Però ci si avvicina alle condizioni di questo caso puramente teo-

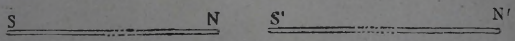


Fig. 288

rico colla disposizione seguente. Due fili di acciaio NS, $N'S'$ (fig. 288) sottili e lunghissimi, presentano i poli ai loro estremi.

Disponiamoli di seguito l' uno all' altro, in modo che la distanza NS' sia trascurabile rispetto alla lunghezza dei due fili. Allora soltanto i due poli N, S' hanno azione sensibile tra di loro, mentre S, N' per la loro grande distanza hanno azioni tutt' affatto insignificanti, sia fra loro che sui poli S' ed N. Quindi possiamo ritenere praticamente che i due poli N, S' si comportino come se fossero isolati.

In tal caso dunque, la forza colla quale si attraggono i due poli N, S' si può misurare — come fece Coulomb — colla stessa *bilancia di torsione* (§ 257), con cui Coulomb stesso determinò anche la forza attrattiva o repulsiva tra corpi elettrizzati.

Dalle misure eseguite ne è risultata la *legge di Coulomb*, che *la forza che si esercita tra due poli è inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.*

320 — Quantità di magnetismo. — Ora supponiamo che la forza attrattiva o repulsiva che si esercita tra un polo A (fig. 289) e un polo B, posti alla distanza r, sia uguale a quella che si esercita tra lo stesso A ed un terzo polo C, situati essi pure alla distanza r. Diremo allora che B e C posseggono *uguali quantità di magnetismo* o *uguali masse magnetiche.*

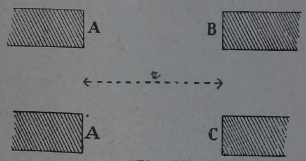


Fig. 289

E se invece — mantenendo ancora invariati il polo A e la distanza r — troviamo che un polo C risente una forza 2,3... n volte maggiore di quella che risente B, allora si dirà che C ha una *quantità di magnetismo 2, 3...n volte più grande* di quella posseduta da B.

Così — per definizione — la forza di attrazione o di repulsione che si esercita tra due poli magnetici è *direttamente proporzionale alle loro quantità di magnetismo.*

Questo enunciato, insieme alla legge delle distanze di cui si è prima parlato, si può esprimere colla formula:

$$F = k \frac{mm'}{r^2}, \qquad (4)$$

dove F è l' intensità della forza, m, m' sono le due quantità di magnetismo, e k è un coefficiente costante che dipende dalle unità di misura e dal mezzo in cui si trovano i poli magnetici.

Ora, nelle misure scientifiche si è convenuto di prendere per *unità di quantità di magnetismo quella di un polo che, posto nell'aria alla distanza di un centimetro da un altro polo identico, lo attira o lo respinge con la forza di una dina*. Allora, nella formula (4) esprimiamo F in dine ed r in centimetri, e facciamo $m = m' = 1$, ed $r = 1$ cm.; per la definizione data, F risulta uguale ad una dina, e perciò si avrà nell'aria $k = 1$.

La formula quindi prende l'espressione più semplice:

$$F = \frac{m\,m'}{r^2}.$$

Campo magnetico.

321 — **Linee di forza.** — Tutto lo spazio, nel quale si fanno sentire le azioni di una o più masse magnetiche, si dice *campo magnetico*.

Teoricamente, come risulta subito dalla legge di Coulomb, questo campo avrebbe il suo limite a distanza infinita, ma in pratica esso si suppone esteso fin dove le azioni cessano di essere apprezzabili.

Se in un punto qualunque del campo, collochiamo un polo che abbia l'*unità di quantità di magnetismo*, su di esso si eserciterà una forza ben determinata, dipendente dalle masse magnetiche che producono il campo.

Ora, la *forza che agisce sul polo unitario posto in un dato punto del campo* si chiama *forza magnetica* o *intensità del campo* in quel punto. Tale forza avrà una certa direzione, che si può determinare sperimentalmente così.

Portiamo nel punto considerato A del campo una piccola calamita esploratrice ns (fig. 290), di lunghezza e di peso trascurabili, tanto da poterla praticamente ritenere sottratta a qualunque azione estranea. La direzione assunta da tale calamita ci dà la direzione della forza magnetica che si esercita in A, o — come si suol dire — la *direzione del campo* nel punto A.

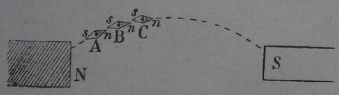


Fig. 290

Quanto poi al senso, sceglieremo quello che va dal polo *sud* al polo *nord* della calamita esploratrice, ossia il senso che va da s verso n nella figura 290.

Così, per ogni punto di un campo magnetico, la forza ha un' intensità, una direzione ed un senso ben definiti.

Se ora in un punto B preso nella direzione $s\ n$ e *vicinissimo* ad A, trasportiamo il centro della nostra piccola calamita, avremo, in modo analogo, la direzione che ha quivi il campo.

Per tal modo seguitando per i successivi punti C, D, ecc., faremo percorrere al centro della calamita una linea che si chiama *linea di forza*. Dunque la direzione di questa linea, cioè quella della tangente in uno qualunque dei suoi punti, è la direzione della forza magnetica in quel punto.

E poichè per senso della forza magnetica noi abbiamo convenuto di assumere quello verso cui è sollecitato a muoversi un polo nord, così *in un campo magnetico il senso positivo delle linee di forza sarà quello che va esternamente dal polo nord delle calamite verso il polo sud.*

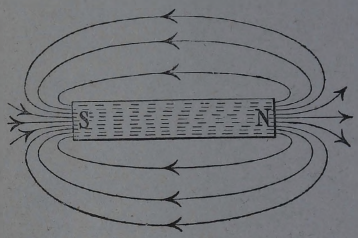


Fig. 291

In alcuni casi poi fa comodo immaginare prolungate le linee di forza anche nell' interno delle calamite. In ogni magnete dunque, esse saranno dirette *internamente dal polo sud al polo nord* (fig. 291).

È chiaro infine che per ogni punto del campo passa una linea di forza. E ne passa una sola, perchè altrimenti la forza magnetica avrebbe in un punto più di una direzione.

322 — **Spettri magnetici.** — Le linee di forza si possono agevolmente materializzare mediante la limatura di ferro. Disponiamo un foglio di carta, o di sottile pergamena $A\,A$ (fig. 292) tesa su di un tamburo $T\,T$, al disopra d' un magnete M; e mediante uno staccio facciamo cadere su $A\,A$ della sottile limatura di ferro, avendo cura di dare alla pergamena piccoli colpettini, perchè ogni granello si orienti più facilmente.

Fig. 292

Come abbiamo detto al § 318, ogni granello diventa un magnete, e si dispone quindi col suo diametro maggiore secondo la direzione di una linea di forza.

Infatti, vediamo i granelli mettersi in file regolari che disegnano linee continue e che terminano con ciascuno degli estremi sopra un polo. Queste linee sono appunto *linee di forza*. Il loro insieme costituisce ciò che si chiama *spettro magnetico*.

La figura 293 rappresenta lo spettro di un magnete a forma prismatica. La figura 294 quello di due sbarre prismatiche coi due poli omonimi affacciati; nella figura 295 sono invece affacciati i poli di nome opposto. Infine la figura 296 mostra lo spettro di un *magnete a ferro di cavallo*.

Due casi di particolare importanza sono mostrati dalle figure 297 e 298.

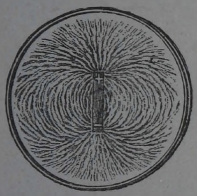


Fig. 293

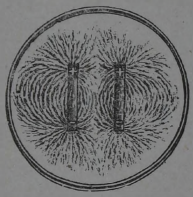


Fig. 294

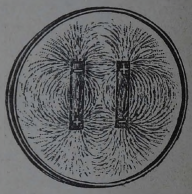


Fig. 295

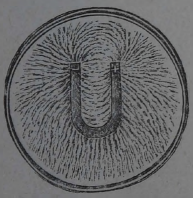


Fig. 296

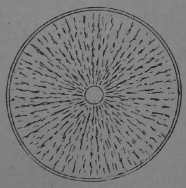


Fig. 297

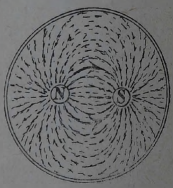


Fig. 298

Nel primo si ha lo spettro magnetico dovuto ad un polo isolato, che si realizza con una calamita assai lunga; le linee di forza sono allora rette che irraggiano tutto attorno.

Nel secondo caso si ha lo spettro dovuto a due poli di nome opposto, e le linee di forza sono curve regolari che partono da uno di essi per giungere all' altro.

323 — **Campo magnetico uniforme.** — Ora, un campo magnetico dicesi *uniforme* quando le linee di forza sono rette tra loro parallele; in tal caso si può dimostrare col calcolo — e l' esperienza lo conferma — che l' intensità del campo è la stessa in tutti i punti.

Dall' esame degli spettri magnetici si può desumere che, se noi ci limitiamo a considerare una regione del campo sufficientemente ristretta, possiamo ammettere che in quella regione il campo sia uniforme. Infatti si osserva che in un piccolo spazio le linee di forza si mantengono sensibilmente parallele tra loro.

324 — **Rappresentazione di un campo magnetico.** — Disegnando in un campo un numero sufficiente di linee di forza, potremo intanto con facilità desumere in ogni punto la direzione del campo stesso.

Infatti, in un punto A (fig. 299) che giace su una di queste linee di forza, la direzione sarà data da At, tangente nel punto A alla linea; e in un altro punto B, la direzione del campo Bt' potrà con molta approssimazione desumersi dall' andamento delle linee di forza vicine.

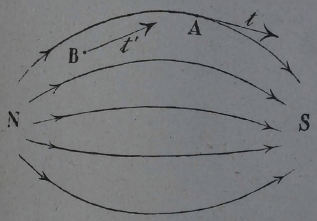


Fig. 299

Ma è facile, con una opportuna convenzione, desumere anche in grandezza l' intensità del campo nei vari punti, fissando che il numero delle linee di forza, che attraversano una data regione del campo, sia limitato, e per l' appunto sia proporzionato al valore che ha l' intensità del campo nel centro di tale regione.

Abbiansi, ad esempio, due punti A e B (fig. 300) di un campo magnetico, tali che in B l' intensità del campo sia doppia che in A; allora immagineremo che le linee di forza nei dintorni di B sieno fitte il doppio che nei dintorni di A.

Più esattamente, chiamiamo n il numero delle linee di forza che attraversano una piccolissima superficie α, la quale contenga il punto A e sia *normale alla direzione che ha in A il campo magnetico.* Per esprimere che in B si ha intensità doppia, supporremo che il numero delle linee di forza, che attraversano la superficie β, uguale ad α e *normale alla direzione del campo in B*, sia uguale a $2n$. E così, se in un altro punto C l'intensità del campo è tripla che in A, supporremo che il numero delle linee di forza, che attraversano una superficie γ, uguale ad α e normale in C alla direzione del campo, sia $3n$; e via di seguito.

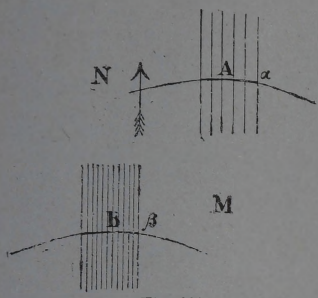


Fig. 300

Ora, il fascio delle linee di forza che attraversano la superficie α ci dà subito l'idea di un *flusso* di un qualche cosa che va nella direzione della freccia dalla regione M alla regione N (fig. 300); perciò al numero delle linee costituenti quel fascio si è posto il nome di *flusso di forza.*

Per esprimere poi il valore del flusso di forza si è convenuto che il numero delle linee di forza, che attraversano l'unità di superficie nei dintorni di un punto A, sia uguale al numero che rappresenta l'intensità del campo in A; ossia, che *l'intensità del campo sia rappresentata dal flusso di forza che attraversa l'unità di superficie normale al campo in quel punto.*

Ne segue che l'intensità del campo nel punto A viene espressa dal quoziente che si ottiene dividendo il numero n di linee di forza che attraversano una porzione piccolissima di superficie normale al campo nel punto A, per l'area della superficie stessa.

Induzione magnetica.

325 — Ora, un pezzo di ferro dolce posto in un campo magnetico diviene — come sappiamo (§ 315) — un magnete

temporaneo. Questo fenomeno ha avuto il nome d' *induzione magnetica*.

In corrispondenza con quanto poco fa abbiam detto (§ 321) sulla direzione delle linee di forza, si vede (fig. 301) che *si forma un polo sud dalla parte ove le linee di forza arrivano al ferro, e un polo nord da quella donde si allontanano.*

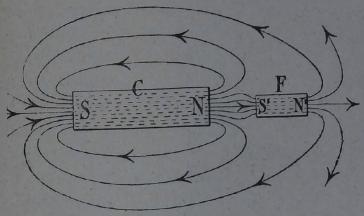


Fig. 301

In altri termini, possiamo dire che nel pezzo di ferro *F* si forma un polo sud nella parte più vicina al polo nord del magnete C, e un polo nord nella parte più lontana.

Per altro bisogna osservare che un pezzo di ferro, introdotto in un campo magnetico, porta — per effetto della sua stessa magnetizzazione — una perturbazione nell' andamento primitivo delle linee di forza; ossia, queste si concentrano in gran numero nel pezzo di ferro *F*, come indica la figura 302.

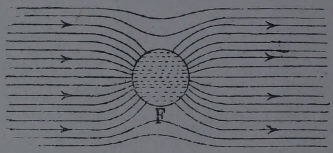


Fig. 302

Si può paragonare la cosa al passaggio dell' acqua attraverso ad un filtro *A B* (fig. 303) di cui la porzione *C D* si faccia *molto più permeabile* che il resto. L' acqua passerà in molto maggior copia per la detta porzione *C D*. Si suole dire, per analogia, che il ferro ha una *permeabilità* molto maggiare dell'aria per le linee di forza, e che perciò queste tendono il più possibile a passare per il ferro, formando attraverso una qualunque sezione di questo un flusso molto più grande che attraverso una ugual sezione nell' aria.

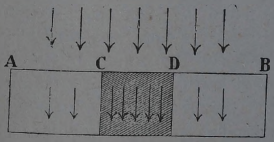


Fig. 303

Alle linee di forza quando attraversano un corpo magnetico (ferro, acciaio, nikel, ecc.) si suol dare spesso il nome di *linee di induzione*. E il numero delle linee di induzione che attraversano una data superficie, comunque condotta nel campo magnetico, si chiama *flusso d'induzione* attraverso quella superficie.

326 — **Schermi magnetici.** — Da quanto abbiamo detto scaturisce una notevole conseguenza.

Immaginiamo infatti di introdurre in un campo magnetico un blocco di ferro dolce avente nel suo interno una cavità *B* (fig. 304). Le linee di forza, penetrate nel pezzo di ferro, preferiranno in gran parte attraversare lo spessore di questo, che è molto permeabile, piuttostochè penetrare dentro la cavità, che offre al flusso di forza magnetica una resistenza molto maggiore.

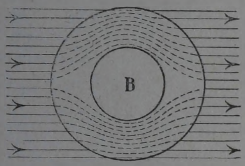


Fig. 304

Segue allora che se un corpo qualunque si trova situato nella cavità *B*, esso non subirà affatto l' azione del campo magnetico esterno. Perciò, quando si vuol difendere un corpo dall'influenza magnetica di altri corpi, lo si avvolge con uno spesso involucro di ferro dolce; a tale involucro si dà il nome di *schermo magnetico*.

Magnetismo terrestre.

327 — **Campo magnetico terrestre.** — Abbiamo veduto (§ 317) che in ogni luogo un ago magnetico sospeso ad un filo si orienta in una determinata direzione. Perciò dobbiamo concludere che in ogni punto del globo terrestre esiste un campo magnetico. Inoltre, qualunque sia il luogo in cui facciamo l'osservazione, sappiamo che l' ago si dispone nella direzione sud nord ; quindi il campo magnetico della Terra è come se fosse creato da un enorme magnete che avesse il polo di magnetismo nord situato in prossimità del polo australe della Terra, e il polo di magnetismo sud vicino al polo boreale della Terra.

328 — **Declinazione magnetica.** — Un' osservazione più accurata ci apprende però che la direzione dell' ago magnetico non coincide esattamente con quella del meridiano geografico del luogo. Sospendiamo l' ago *S N* (fig. 305) su di un pernio *O*, in modo che l' ago sia liberamente girevole in un piano orizzontale. Allora osserveremo che la retta *M M* che congiunge i poli dell'ago non ha la stessa direzione della *linea meridiana G G*.

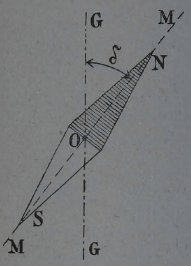


Fig. 305

Ora, il piano verticale che passa per l'ago magnetico dicesi *meridiano magnetico* del luogo; l' angolo δ compreso tra il meridiano geografico *G G* e il meridiano magnetico *M M* dicesi *declinazione magnetica* nel luogo considerato. Essa si distingue in *orientale* e *occidentale*, a seconda che il polo nord dell' ago cade all' est od all' ovest del meridiano geografico del luogo.

329 — **Inclinazione magnetica.** — Quando l'ago però è libero di muoversi intorno al proprio centro di gravità, di solito non si dispone orizzontalmente. L' apparecchio che si adopera per dimostrar ciò è rappresentato dalla figura 306.

Il pernio dell' ago — passante per il centro di gravità *G* — è girevole entro la staffa *s* sospesa ad un filo di seta *a* senza torsione.

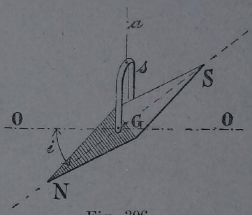


Fig. 306

Abbandonato a sè stesso, l' ago si porterà allora *nel piano del meridiano magnetico*. Però non si disporrà orizzontalmente: farà invece con la orizzontale *O O* un angolo *O G N*, che è detto *inclinazione magnetica* del luogo considerato.

Cioè, dicesi *inclinazione magnetica l' angolo che fa coll' orizzonte un ago girevole, nel piano del meridiano magnetico, intorno ad un asse passante pel suo centro di gravità.*

330 - Variazioni degli elementi magnetici. — L' inclinazione e la declinazione magnetica variano da luogo a luogo. Entrambi questi due elementi poi, anche per uno stesso luogo, subiscono variazioni col tempo; le quali si distinguono in *regolari* e *accidentali*.

Importa sopratutto conoscere le variazioni della declinazione in un dato luogo.

Le variazioni accidentali della declinazione consistono in piccole oscillazioni, che si compiono in modo repentino in un verso o nell' altro. Quando ciò avviene, si dice che si ha una *burrasca magnetica*. Di solito le burrasche magnetiche accompagnano l' apparizione delle aurore polari nelle alte latitudini.

Le variazioni regolari per altra parte soglionsi distinguere in *diurne* ed *annue*.

Le variazioni diurne consistono in un moto oscillatorio dell' ago, il quale impiega un giorno intero a compiere una oscillazione completa. Il moto avviene come se l' ago sfuggisse il sole nel suo corso apparente intorno alla terra. L' ampiezza dell' oscillazione non supera mai i 10′. La posizione media intorno alla quale oscilla l' ago durante la giornata fa col meridiano un angolo detto *declinazione media diurna*.

Le variazioni annue consistono in un movimento regolare della *posizione media diurna dell' ago*. Essa varia compiendo in un anno un' oscillazione completa intorno ad una posizione media, la quale dà la *declinazione media annuale*.

Tuttavia la declinazione media annuale non serba neppure essa un valore costante; ma varia periodicamente riprendendo il proprio valore in un periodo di 11 anni circa: periodo che corrisponde a quello dell' attività delle macchie solari.

331 — Carte magnetiche. — Il valore medio della declinazione dedotto dalle misure di parecchi anni è stato determinato per moltissimi punti della Terra. Riunendo su di una carta geografica tutti i luoghi in cui la declinazione ha lo stesso valore, si ottiene una linea che vien detta *isogona*. Riunendo invece tutti i punti che presentano la stessa inclinazione, si hanno altre linee che vengono dette *isocline*. Una carta dove siano segnate le isogone e le isocline dicesi *carta magnetica*. La figura 307 rappresenta la carta magnetica dell' Italia per l' anno 1910.

La figura 308 rappresenta poi le linee isocline tracciate per l'emisfero boreale. Esse vanno restringendosi intorno ad un punto A, dove l'inclinazione è di 90°. Un ago sospeso in questo punto pel suo centro di gravità, si dispone verticalmente. Tale

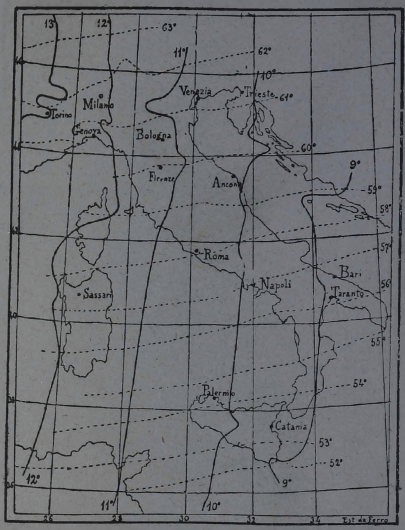


Fig. 307

punto vien detto *polo magnetico nord terrestre*, ed è situato nell'isola di Melville.

Anche nell'emisfero australe le linee isocline convergono in un punto, che è il *polo magnetico sud terrestre*.

Nella figura 308 sono anche disegnate le *curve meridiane magnetiche*, convergenti nel punto A, le quali rappresentano le linee che percorrerebbe un viaggiatore che seguisse costantemente la direzione indicatagli dall'ago magnetico.

Fra le isocline poi ve n'è una, per la quale l'inclinazione

è nulla; cioè, lungo essa l' ago si dispone orizzontalmente. A

Fig. 308

questa linea si dà il nome di *equatore magnetico*.

332 — **Bussola marina.** — Coll' aiuto delle carte magnetiche si può, dalla direzione dell' ago, determinare quella del meridiano astronomico: il che torna sopratutto utile ai naviganti. L' istrumento da essi usato è detto *bussola marina*.

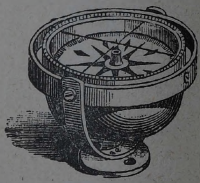


Fig. 309

Essa si compone di un ago magnetico girevole in un piano orizzontale intorno ad un pernio, sul quale esso si appoggia mediante un cappellotto di agata. Per garantire l' ago dalle scosse cagionate dai movimenti della nave, il pernio è fissato al fondo di una scatola zavorrata, sostenuta con una *sospensione cardanica*, come mostra la figura 309. L' ago segna così la direzione del meridiano magnetico. Conoscendo allora la declinazione magnetica, data dalle apposite carte, si deduce la direzione del meridiano geografico, secondo il quale si regola la rotta della nave.

Effetti magnetici della corrente.

333 — **La corrente elettrica crea un campo magnetico.** — Dicemmo già (§ 313) che tra gli effetti prodotti da una corrente elettrica che percorre un circuito, vi è pur quello di provocare tutto attorno, nel mezzo circostante, dei fenomeni magnetici.

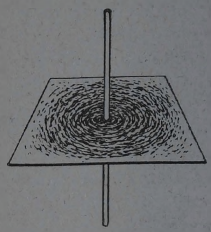


Fig. 310

Il fatto fondamentale, che una corrente dà origine ad un campo magnetico, fu scoperto da Oersted, e ne possiamo dare la dimostrazione con la seguente esperienza.

Prendiamo un filo metallico teso verticalmente (fig. 310), in cui sia infilato un cartoncino orizzontale; e mandiamovi una corrente elettrica. Spargiamo sul cartoncino della limatura di ferro e con leggeri scuotimenti facciamola saltellare, perchè sia più libera di obbedire alle forze che la sollecitano. La vedremo disporsi a cerchî concentrici attorno al filo: essi mostrano l' andamento delle linee di forza (§ 322). Dunque: *Un filo conduttore percorso da corrente dà origine ad un campo magnetico, le cui linee di forza sono curve chiuse che abbracciano il conduttore stesso.*

334 — **Regola della mano destra.** — Per trovare ora la direzione di questo campo magnetico in ogni punto, prendiamo un ago magnetico $N\ S$ (fig. 311) sospeso pel suo centro di gravità ad un filo di seta: esso — come sappiamo (§ 329) — si dispone allora nella direzione delle linee di forza del campo magnetico terrestre. Avviciniamo all' ago, parallelamente ad esso, un filo metallico AB, nel quale inviamo una corrente elettrica. Vedremo subito l' ago deviare dalla sua posizione, ruotando come indicano le freccie; e la direzione e il senso della forza che sollecita così il polo nord a spostarsi saranno la direzione e il senso del campo magnetico creato dalla corrente.

Orbene, la direzione di questa forza si serba costantemente normale alla corrente: il senso invece cambia col cangiar del senso della corrente stessa.

Si trova in ogni caso con facilità il senso in cui viene spinto il polo nord dell' ago sotto l' effetto della corrente, ricorrendo alla seguente regola pratica:

Se si distende la mano destra lungo il conduttore, in modo che l'indice segni la direzione della corrente, ed il palmo sia rivolto verso l'ago magnetico, allora il polo nord di questo è sollecitato a muoversi nella direzione del pollice.

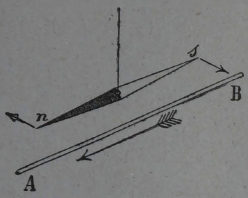


Fig. 311

Il polo sud, invece, vien sollecitato da una forza di senso perfettamente opposto.

L'intensità poi di queste forze, nel caso di un conduttore rettilineo, è tanto maggiore, quanto più vicini si trovano i poli dell'ago al filo conduttore. E in ogni caso tale intensità è *proporzionale alle quantità di magnetismo dei poli ed all'intensità della corrente.*

335 — **Moltiplicatore.** — Pieghiamo ora il conduttore in forma di rettangolo, disponiamolo verticalmente nel piano del meridiano magnetico, e poniamolo nel suo interno un ago calamitato. Quando è percorso dalla corrente, se si applica la regola della mano destra sia al tratto orizzontale superiore del filo, sia al tratto inferiore, come ai due tratti verticali, si vede che il pollice viene sempre a trovarsi da una stessa banda del rettangolo, cioè il polo nord è da ogni tratto sollecitato a muoversi nella stessa direzione; altrettanto accade pel polo sud.

Lo stesso avverrà piegando il conduttore in forma di circolo.

Si osservi però che sopra ognuno dei poli dell'ago agiscono due forze: una, dovuta al magnetismo terrestre, che tende a mantenere l'ago nel piano del meridiano magnetico (§ 328); l'altra, dovuta al campo creato dalla corrente elettrica, che tende a disporlo normalmente al conduttore. Per conseguenza, la direzione finale dell'ago è data dalla diagonale del parallelogrammo formato da queste due forze.

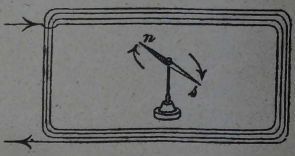


Fig. 312

Ora, l'azione del magnetismo terrestre è costante, mentre abbiam visto invece che la forza esercitata dalla corrente dipende dall'intensità di questa. Talora dunque potrà darsi che la corrente sia molto debole, e

che l' ago non ne risenta alcun effetto sensibile. In tal caso però si avvolge, come nella figura 312, il filo conduttore attorno all' ago parecchie volte: supponiamo *n* volte. Allora una debole corrente, che percorra queste *n* spire, produce lo stesso effetto magnetico di un' altra *n* volte più intensa che percorra una spira soltanto.

Un telaietto su cui sono avvolte così un gran numero di spire di filo metallico, isolato con copertura di gomma o di seta, si chiama *moltiplicatore*.

Quand' esso non è percorso dalla corrente, l' ago nel suo interno è orientato nel piano del meridiano magnetico. Convien dunque disporre in tal piano anche il moltiplicatore, se vogliamo che l' ago, al passare della corrente, ne risenta il massimo effetto.

Galvanometri.

336 — Galvanometro Nobili. — Sui principî ora esposti si fondano gli apparecchi chiamati *galvanometri*, coi quali si può rivelare l' esistenza, e misurare l' intensità, di correnti anche estremamente deboli.

Uno dei più semplici è rappresentato dalla figura 313. È costituito da un moltiplicatore *T*, il cui filo fa capo coi suoi estremi ai morsetti *m m*. L' ago magnetico è sospeso nell' interno del telaio mediante un sottile filo di bozzolo *s*, che passa pel centro del foro *f*; e le sue deviazioni si misurano per mezzo di un indice *i* -- con esso rigidamente congiunto — che può ruotare al di sopra di un cerchio graduato *G*.

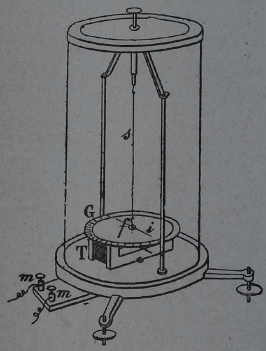


Fig. 313

L' apparecchio vien disposto col telaio nella direzione del meridiano magnetico. Quando s'invia la corrente nel filo del moltiplicatore, l' ago assume una nuova direzione, risultante dalla composizione delle forze che risentono i suoi poli, da parte della corrente e da parte del magnetismo terrestre. E si dimostra che *la tangente trigonometrica dell'angolo di deviazione è proporzionale all' intensità della corrente.*

Però l'azione della terra si può diminuire a piacere — come pensò il Nobili — sostituendo all' indice esterno al telaio, un altro ago magnetico *N' S'*, (fig. 314), parallelo al primo, ma coi poli diretti in senso opposto. La coppia direttrice terrestre sopra un sistema siffatto (*sistema astatico*) è eliminata: ne risulta così notevolmente accresciuta la sensibilità dell'apparecchio.

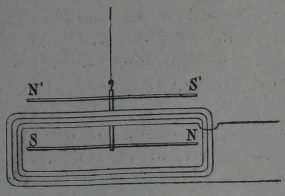


Fig. 314

La sensibilità diventa poi anche maggiore, se — com'è stato fatto in altri galvanometri — l'ago superiore è pure esso contenuto in un altro telaio collegato col primo (fig. 315).

337 — Galvanometro Deprez-D'Arsonval. — Nei galvanometri del tipo ora descritto il moltiplicatore è fisso, e ciò che ruota è l'ago magnetico. Ma siccome le forze magnetiche che si esercitano fra i corpi sono scambievoli, si può anche tener fisso l' ago e lasciar girare il telaietto percorso dalla corrente. I galvanometri della prima specie si dicono *a magnete mobile*, e quelli della seconda specie *a magnete fisso*.

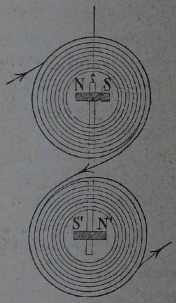


Fig. 315

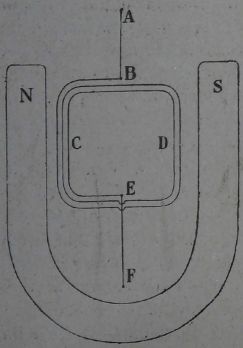


Fig. 316

In questi ultimi la corrente viene mandata in un leggero telaietto *B C D E* (fig. 316), formato di alcune spire di filo conduttore, libero di ruotare attorno ai fili di sospensione *AB*, *EF*, che servon pure a condurre la corrente.

Il telaietto sta sospeso fra i poli *N S* di una forte calamita permanente. Quando una corrente passa pel filo del telaietto, questo, per l' azione che risente per parte dei poli del magnete, tende a disporsi ad angolo retto con esso. Il telaietto pertanto devierà,

finchè al momento della coppia a cui esso è soggetto non faccia equilibrio il momento di torsione del filo di sospensione; e in questo caso *l' angolo di deviazione è proporzionale alla intensità della corrente.*

Il più comune apparecchio di questo tipo è il *galvanometro Deprez-D'Arsonval*, mostrato dalla figura 317.

A A è il magnete permanente, *C C* il telaietto, sospeso al filo metallico *H E; B* è un cilindro di ferro dolce, destinato — in virtù del fenomeno dell'induzione magnetica (§ 325) — a rendere più intenso il campo magnetico nelle vicinanze del telaio.

Il galvanometro Deprez-D'Arsonval — pur non possedendo la squisita sensibilità dei galvanometri a magnete mobile — è utilissimo quando si debbano fare delle esperienze in vicinanza di calamite, o di correnti, o di masse di ferro in movimento, nel qual caso un galvanometro a magnete mobile non potrebbesi usare.

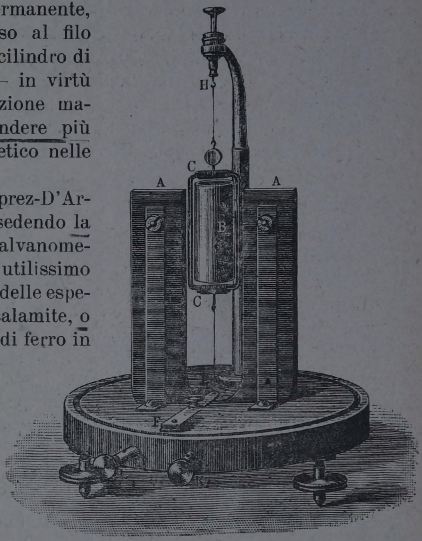


Fig. 317

338 — Letture a riflessione. — I galvanometri possono servire non soltanto a rivelare il passaggio di correnti straordinariamente deboli, ma anche a misurare la loro intensità, deducendola — come s' è detto già — dalla deviazione osservata.

Ora, per riconoscere e misurare facilmente le piccole rotazioni dell' ago, si ricorre spesso alle *letture a riflessione* (§ 247).

Si unisce, cioè, rigidamente, all'ago un leggero specchietto, che rifletta sopra una scala graduata i raggi luminosi di una lampada. Interponendo una lente convergente sul loro cammino, si fa formare una immagine reale della lampada sopra la scala; gli spostamenti di questa immagine ci forniscono allora gli angoli di cui ruota lo specchio congiunto all' ago. Onde poter poi desumere l'intensità della corrente da questi angoli di rotazione, occorre una volta per sempre campionare il galvanometro.

339 — Campionamento d' un galvanometro. — Per eseguire tale campionamento si dispone il galvanometro in serie con un adatto voltametro — per es. a nitrato d' argento (§ 301) — e si fanno insieme attraversare da una debole corrente costante.

Dopo un certo tempo t, si determina l' aumento di peso che ha subìto il catodo per l' avvenuta elettrolisi. Se ne dedurrà allora facilmente la quantità complessiva q di elettricità che è passata attraverso il voltametro, sapendo che ogni coulomb fa deporre gr. 0,001118 di argento metallico (§ 303).

Ora, il numero dei coulomb che passano in 1 secondo misura appunto l' intensità della corrente (§ 304). Dunque l' intensità i — ch' è rimasta costante in tutto l' intervallo di tempo — sarà data in ampère dalla formula:

$$i = \frac{q}{t}. \qquad (5)$$

Questa è perciò l' intensità che corrisponde alla deviazione osservata dell' ago del galvanometro.

Possiamo allora trovare il coefficiente di proporzionalità fra l' intensità della corrente e l' angolo di deviazione, pei galvanometri a magnete fisso, o fra la stessa intensità e la tangente trigonometrica dell' angolo di deviazione, pei galvanometri a magnete mobile. Così l' apparecchio è campionato.

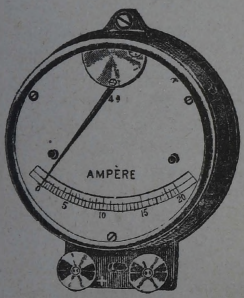


Fig. 318

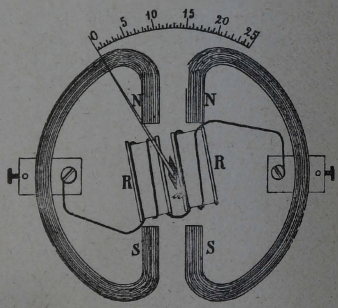


Fig. 319

340 — Amperometri. — Specialmente negli usi industriali, per le misure di corrente si adoperano spesso apparecchi portatili, detti *amperometri* (fig. 318), i quali altro non sono, in sostanza, che galvanometri meno sensibili.

La costruzione interna di questi apparecchi è molto varia; ma una delle disposizioni più usate è mostrata dalla figura 319.

Un forte campo magnetico è originato da due potenti calamite *NS* piegate a C, tra i cui poli è situato un rocchetto *RR* di poche spire, disposto obliquamente sulla linea dei poli stessi. Entro a questo è imperniato un corto ago di ferro dolce *a*, al quale è unito un indice mobile sopra una graduazione.

Quando passa la corrente, l' ago, che i magneti tendono a mantenere parallelamente alle linee *NS*, viene invece dalla corrente sollecitato a disporsi normalmente alle spire del rocchetto. L' indice si fermerà sopra una posizione tale, per cui le due azioni si compensano. Per ogni valore dell' intensità di corrente si ha così una determinata posizione d' equilibrio, e quindi l' apparecchio — una volta campionato — può servire per la misura di una corrente qualunque.

Elettrocalamite.

341 — **Solenoidi.** — Lo studio, da noi intrapreso, del campo magnetico creato da una corrente elettrica, acquista interesse speciale, quando la corrente percorre una spira circolare *abcd* di filo conduttore (fig. 320). Il campo allora è identico — come si riconosce dall' andamento delle linee di forza — a quello che sarebbe prodotto da una calamita molto breve e colle faccie polari molto ampie, ossia da una *lamina magnetica*, che occupasse per intero la superficie racchiusa dalla spira ed avesse i poli estesi quanto le sue due faccie. E precisamente, come sappiamo (§ 321), quella faccia *N* della spira per la quale escono le linee di forza ha le proprietà di una faccia polare nord; l' altra *S*, per la quale le linee di forza entrano, ha le proprietà di una faccia polare sud. Facendo uso poi della regola della mano destra (§ 334), si conclude facilmente che una faccia della spira avrà proprietà di polo sud o nord, secondochè rispetto a noi che stiamo di fronte a quella faccia, la corrente circola nel senso degl' indici d' un orologio o nel senso opposto.

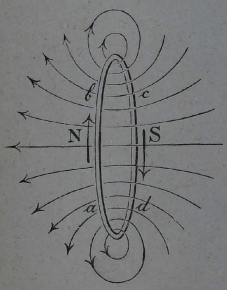


Fig. 320

Ora, se noi sovrapponiamo l' una all' altra parecchie di queste spire, in modo che si trovino adiacenti le faccie che hanno polarità opposte (fig. 321), l' insieme si comporterà come una sbarra calamitata, colle due faccie estreme dotate di proprietà magnetiche di polo nord e polo sud rispettivamente.

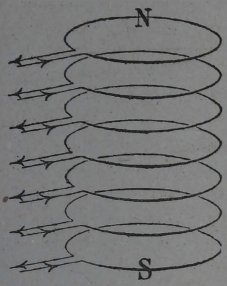


Fig. 321

Si può più comodamente realizzare un simile dispositivo, avvolgendo un medesimo filo a spirale (fig. 322), colle spire abbastanza serrate fra loro. Si ottiene allora ciò che si chiama comunemente un *solenoide*.

Se noi guardiamo la sua faccia terminale *da cui escono le linee di forza* (Vedi freccia *a*) la corrente circolerà rispetto a noi nel senso — indicato dalla freccia *b* — opposto a quello degl' indici di un orologio, e si avrà qui la faccia polare *nord:* l' altra sarà la faccia *sud*.

L' andamento delle linee di forza nell' interno di un solenoide si può facilmente esplorare col solito espediente degli spettri magnetici (§ 322), introducendo nel solenoide stesso longitudinalmente una striscia di cartoncino cosparsa di limatura di ferro (fig. 323).

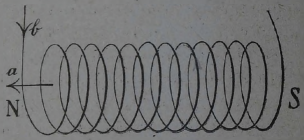


Fig. 322

La limatura, disponendosi secondo le linee di forza, ci mostrerà che esse sono rette parallele fra loro, dirette secondo l' asse del solenoide. Perciò, se noi misurassimo l' in-

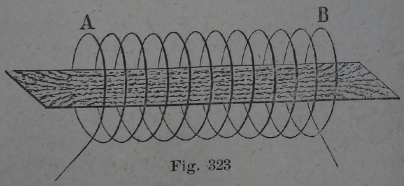


Fig. 323

tensità del campo magnetico, la troveremmo sensibilmente uguale nei varî punti interni.

Dunque, nell'interno d'un solenoide percorso da corrente, si ha un campo magnetico uniforme. Però la sua intensità è proporzionale all'intensità della corrente; e, a parità di questa, cresce proporzionalmente al numero dei giri che fa il filo per una stessa lunghezza *AB* del solenoide (fig. 323).

342 — **Elettrocalamite.** — Ora, prendiamo una sbarra di ferro dolce e introduciamola nel campo magnetico d'un solenoide (fig. 324). Per quanto imparammo a suo tempo, dovrà prodursi il fenomeno dell' induzione magnetica (§ 325): il ferro si magnetizzerà, originandosi un polo nord nella estremità da cui escono le linee di forza, ossia dalla parte della faccia nord del solenoide, e un polo sud dalla parte della faccia sud.

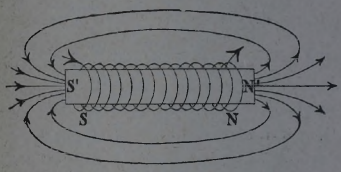


Fig. 324

Quando noi interrompiamo il passaggio della corrente, aprendo in un punto qualunque il circuito di questa, il ferro dolce perde quasi totalmente la sua polarità magnetica, e torna allo stato naturale; esso formava dunque un magnete temporaneo (§ 315). Se invece avessimo introdotto nel solenoide una sbarra di acciaio, essa pure si sarebbe magnetizzata — per quanto un po' meno intensamente del ferro dolce — ma, al cessare della corrente, avrebbe conservato sempre molto evidenti le sue proprietà magnetiche, ossia si sarebbe ottenuto un magnete permanente.

Nella pratica si adopera questo metodo per ottenere potenti calamite temporanee, cui si dà il nome di *elettromagneti* o *elettrocalamite*.

A tal uopo sopra un tubo isolante si avvolgono un gran numero di spire di filo isolato, sovrapposte in più strati; ed il loro insieme si chiama *rocchetto*. Nell'interno del rocchetto si pone una sbarretta di ferro dolce, che prende il nome di *nucleo*. Così, durante il passaggio della corrente, il ferro si magnetizza fortemente; e si smagnetizza poi quasi del tutto quando la corrente s' interrompe.

Le elettrocalamite offrono perciò un mezzo prezioso per fare agire a distanza, oppure fermare, al momento opportuno, un qualsiasi meccanismo.

Praticamente si danno alle elettrocalamite varie forme: o *rettilinea* (fig. 325), o più spesso *a ferro di cavallo* (fig. 326) o *a doppia squadra* (fig. 327), con due rocchetti che si fanno

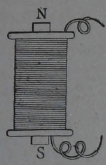


Fig. 325

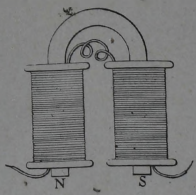


Fig. 326

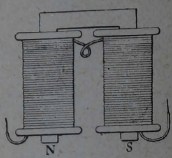


Fig. 327

percorrere successivamente dalla corrente in senso inverso, in modo da ottenere alle estremità *N*, *S* del ferro le due polarità opposte.

Applicazioni delle elettrocalamite.

343 — **Soneria elettrica.** — Le elettrocalamite sono di largo uso in quasi tutte le applicazioni elettriche. E noi ci fermeremo a descriverne due, che incontriamo ogni giorno negli usi della vita comune: cioè la *soneria elettrica* ed il *telegrafo*.

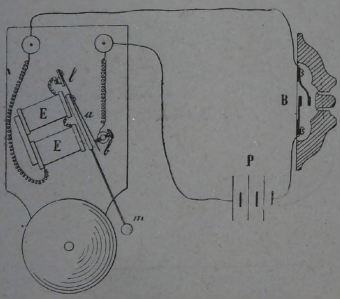


Fig. 328

Una soneria elettrica è rappresentata dalla figura 328. Si ha in essa un' elettrocalamita *EE*, presso i cui poli la molla *l* sostiene un pezzo di ferro dolce *a*, detto *àncora*.

Nella posizione di riposo l'ancora fa contatto metallico con la punta di una vite *b*; così, quando si preme il bottone *B*, il circuito della pila *P* viene ad essere chiuso e la corrente circola nelle spire dell' elettrocalamita.

Questa si magnetizza ed attira l'ancora *a*; ma allora interrompendosi il circuito alla punta della vite *b*, la corrente cessa e la molla antagonista *l* riporta indietro l' ancora.

Tosto il contatto fra *a* e *b* si ripristina, e l'ancora viene attratta di nuovo: e così di seguito.

L'àncora perciò oscilla rapidamente, e il martelletto *m* ad essa congiunto, battendo in un campanello, lo fa suonare per tutto il tempo in cui si preme il bottone *B*.

344 — Telegrafo. — Il telegrafo, a cui fu data una forma veramente pratica dal Morse, consta di due parti: il *trasmettitore*, collocato nella stazione trasmittente, che serve a mandare i segnali alla stazione ricevitrice; e il *ricevitore*, collocato in quest'ultima, destinato a ricevere i segnali medesimi.

I due apparecchi sono congiunti da fili, e fanno parte di un unico circuito metallico comprendente una batteria di pile.

Il trasmettitore è formato semplicemente da un interruttore a molla *T* (fig. 329), detto *tasto*, il quale chiude il circuito della corrente fornita dalla pila *P*.

Il ricevitore, collocato nell'altra stazione, è formato con una semplice elettrocalamita *E* a ferro di cavallo, che ha dinanzi a sè un'ancora mobile, *a*, di ferro dolce. Ad ogni pas-

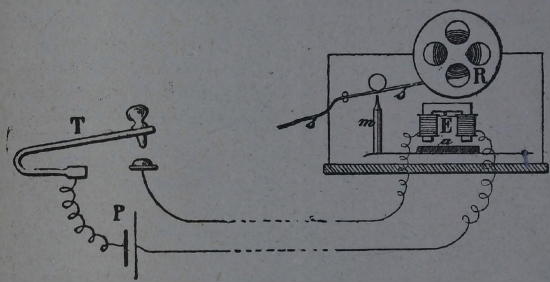


Fig. 329

saggio della corrente, l'elettrocalamita attira l'ancora, e allora una matita *m*, fissata all'ancora stessa, va a battere contro una striscia di carta, *ss*, che viene svolta uniformemente dalla ruota *R* mediante un movimento di orologeria.

È chiaro che, se il tasto è tenuto abbassato per un tempo brevissimo, l'ancora viene attratta e poi subito abbandonata; la matita segna quindi un punto: se, invece, il tasto vien tenuto abbassato per qualche istante, la matita preme per un certo tempo sulla carta che si svolge, e vi segna una lineetta.

Mediante uno speciale alfabeto, immaginato da Morse, le cui lettere sono formate da punti e linee variamente combinati, è possibile esprimere qualunque segno ortografico, e quindi qualunque parola.

Il circuito che unisce le due stazioni dovrebbe esser formato di due fili: uno per l'andata e l'altro per il ritorno della corrente; ma si è riconosciuto che è possibile sostituire ad uno dei fili conduttori il suolo, il che permette una notevolissima economia nelle spese di impianto.

Azioni elettrodinamiche.

345 — Pel fatto che una corrente elettrica dà origine ad un campo magnetico, si dovranno avere fra due conduttori percorsi da corrente delle azioni attrattive e repulsive, come quelle che si esercitano fra due calamite. Queste azioni — dette *azioni elettrodinamiche* — vennero scoperte da Ampère, e si possono riassumere così:

1.° Due correnti rettilinee parallele si attraggono se sono dirette nel medesimo senso (fig. 330), *si respingono se sono dirette in senso contrario* (fig. 331).

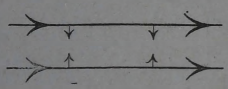


Fig. 330

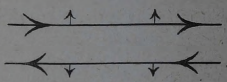


Fig. 331

2.° Due correnti rettilinee ad angolo si attraggono se sono dirette ambedue verso il vertice dell'angolo acuto (fig. 332), *si respingono nel caso contrario* (fig. 333).

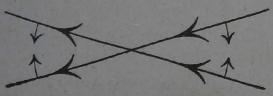


Fig. 332

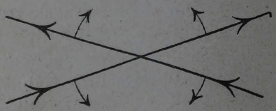


Fig. 333

Queste leggi si possono dimostrare facilmente mediante un filo conduttore *ABCD* fig. 334), piegato a rettangolo, di

cui le estremità *m*, *n*, pescano in due pozzetti di mercurio, in modo che il rettangolo può ruotare attorno ad un asse verticale.

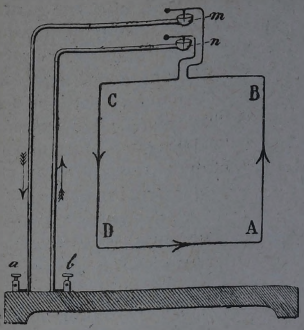


Fig. 334

Posti i pozzetti di mercurio in comunicazione coi due poli di una pila, basta avvicinare ad un lato del rettangolo un filo di rame percorso dalla corrente, per verificare, nei vari casi, le azioni indicate dalle leggi sopra riferite.

3.° *Una corrente sinuosa* (fig. 335) *esercita la stessa azione di una corrente rettilinea dello stesso senso e avente gli stessi estremi A, B.*

E infatti, avvicinando ad uno dei lati del solito rettangolo mobile, due fili — uno rettilineo e l'altro sinuoso — come quelli della figura 335, ma percorsi dalla corrente in sensi opposti, non si osserva nessuna azione, nè attrattiva nè repulsiva.

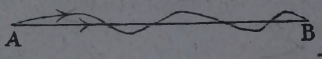


Fig. 335

Legge di Ohm.

346 — Potenziale lungo un conduttore percorso da corrente. — Per studiare gli altri effetti della corrente (effetti termici), è necessario che prima conosciamo da quali elementi dipende l'intensità della corrente stessa.

Sappiamo che la corrente che si genera in un filo conduttore che congiunga i due poli di una macchina elettrostatica, o quelli di una pila, si può riguardare come il passaggio di elettricità positiva dal polo positivo verso il negativo.

Un capo del conduttore si trova in tal caso ad un potenziale più elevato dell'altro capo: si tratta di vedere come varia il potenziale lungo il conduttore, supposto omogeneo ed uniforme.

Per risolvere tale questione prendiamo una pila P (fig. 336) composta di parecchi elementi Daniell riuniti in serie (§ 262), e congiungiamone i poli coi due estremi a, b di un filo metallico isolato, molto lungo e sottile ff, di diametro costante in tutta la sua lunghezza. Carichiamo poi, con una bacchetta di ebanite elettrizzata, l'ago di un elettrometro, del quale una coppia di quadranti è in comunicazione col suolo. Allora un filo metallico, connesso coll'altra coppia di quadranti, ci permetterà di esplorare il potenziale nei varî punti di f.

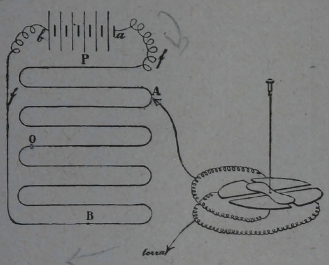


Fig. 336

Anzitutto portiamo questo filo a contatto con un punto A di f prossimo al polo positivo della pila: l'ago dell'elettrometro devia, indicando quivi un potenziale positivo assai alto. Spostando in seguito il contatto lungo il filo f, in modo da allontanarci dalla pila, si trova che la deviazione dell'elettrometro è sempre in uno stesso senso e decresce via via in modo regolare, fino a divenire nulla in un punto O situato a metà del filo f: quivi il potenziale è *zero*. Seguitando ancora, l'ago comincia a deviare in senso opposto, indicando un potenziale negativo, sempre più basso (algebricamente) di mano in mano che si avvicina a b.

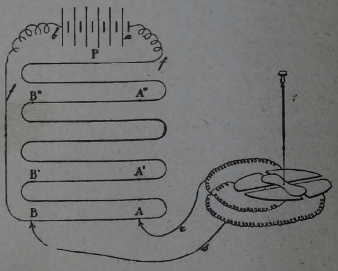


Fig. 337

Per studiare poi le differenze del potenziale nei varî punti, toglieremo la comunicazione col suolo, e congiungeremo, per mezzo dei fili r, s (fig. 337), le due coppie di quadranti con due punti A, B di f. Si noterà una certa deviazione dell'ago. Ebbene, se spostiamo i contatti da A, B in A', B', e successivamente in A'', B'', ecc., in modo che fra essi sia sempre compreso un tratto di lunghezza costante del filo f,

si ottiene una deviazione pure costante nell' elettrometro. Dunque:

La differenza di potenziale (o caduta di potenziale) fra due punti a distanza costante, in un conduttore omogeneo e di sezione uniforme percorso da corrente elettrica, è la stessa dappertutto.

347 — Resistenza elettrica. — Ora è importante ricercare se e come varia la differenza di potenziale fra due punti di un conduttore, variando l'intensità della corrente che lo percorre.

A tale scopo useremo ancora la disposizione del paragrafo precedente, prendendo per f un conduttore *qualunque*, e inserendo inoltre nel circuito un galvanometro G (fig. 338), già campionato (§ 339), col quale misureremo l'intensità della corrente.

Usando tutti gli elementi della pila P disposti in serie, otterremo nel circuito una corrente elettrica d'una certa intensità. Usando invece un numero di elementi più piccolo, troveremo che la corrente attraverso il circuito è meno intensa. Orbene, potremo allora variare l'intensità della corrente, cambiando il numero degli elementi della pila P. E intanto il galvanometro G ci darà ogni volta la misura dell'intensità i della corrente nel circuito, e l'elettrometro ci darà quella della differenza di potenziale $v_A - v_B$ fra due punti A, B del conduttore ff.

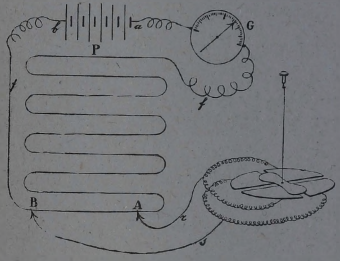


Fig. 338.

Si trova che *a temperatura costante la differenza di potenziale $v_A - v_B$ fra i punti A e B del conduttore è proporzionale all'intensità della corrente.*

Ossia, *il rapporto fra la differenza di potenziale agli estremi di un conduttore qualunque, che non comprenda alcuna forza elettromotrice, e l'intensità della corrente che lo percorre, è costante, mantenendo costante la temperatura.*

Il che può rappresentarsi, indicando con r una costante, colla formula:

$$\frac{v_A - v_B}{i} = r. \qquad (6)$$

Questo rapporto costante r, dicesi *resistenza elettrica* del tratto AB di conduttore, a quella determinata temperatura. È stato scelto un tal nome, perchè, a parità di differenza di potenziale fra i capi di un conduttore, la corrente che percorre il conduttore stesso risulta tanto meno intensa, quanto più grande è il valore di r; come avviene per una corrente liquida, la quale pure è tanto meno intensa, quanto maggiore è la resistenza che incontra nel movimento.

L' inversa della resistenza elettrica di un conduttore si chiama la sua *conducibilità elettrica*.

Per *unità di resistenza* poi, si assume *la resistenza di un conduttore che, avendo i suoi estremi alla differenza di potenziale di 1 volta, vien percorso dalla corrente di 1 ampère*. Questa unità è stata chiamata *ohm*, in onore del fisico che portò questo nome.

348 — Leggi della resistenza elettrica. — a_1) Prendiamo ora diversi conduttori AB, BC, CD (fig. 339) congiunti di seguito l'uno all'altro, ossia disposti *in serie*, e facciamoli per-

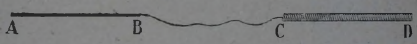


Fig. 339

correre da una corrente d'intensità i. Se v_A, v_B, v_C, v_D sono i valori del potenziale nei punti A, B, C, D di attacco dei varî conduttori, si ha identicamente:

$$\frac{v_A - v_D}{i} = \frac{v_A - v_B}{i} + \frac{v_B - v_C}{i} + \frac{v_C - v_D}{i};$$

e quindi, siccome sappiamo che l'intensità i è la stessa dappertutto, chiamando r_1, r_2, r_3 le resistenze dei tre conduttori, ed R quella del loro insieme, si avrà:

$$R = r_1 + r_2 + r_3. \qquad (\alpha)$$

Dunque: *la resistenza di un complesso di conduttori congiunti in serie è uguale alla somma delle resistenze dei singoli conduttori.*

a_2) In particolare, i pezzi AB, BC, CD possono essere porzioni consecutive di un medesimo filo conduttore omogeneo ed uniforme. Allora dal risultato precedente si ricava che *la resistenza di un conduttore omogeneo e di sezione uniforme è direttamente proporzionale alla sua lunghezza.*

b_1) Ora fra due punti A, B, a potenziale v_A, v_B, intercaliamo insieme, come mostra la figura 340, varî conduttori di resistenze r_1 r_2 r_3. Essi si dicono disposti *in derivazione* fra loro.

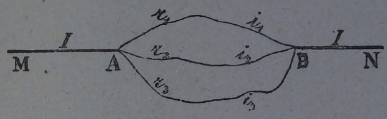


Fig. 340

Sia I l'intensità della corrente principale nei conduttori MA e BN; e chiamiamo i_1, i_2, i_3, le intensità di corrente nei varî rami *derivati*, ed R la resistenza complessiva del loro fascio. Si avrà per la formula (6):

$$\frac{v_A - v_B}{R} = I,$$

$$\frac{v_A - v_B}{r_1} = i_1, \qquad \frac{v_A - v_B}{r_2} = i_2, \qquad \frac{v_A - v_B}{r_3} = i_3.$$

Ma per la 2ª legge di Faraday (§ 305) si ha:

$$I = i_1 + i_2 + i_3;$$

e quindi:

$$\frac{v_A - v_B}{R} = \frac{v_A - v_B}{r_1} + \frac{v_A - v_B}{r_2} + \frac{v_A - v_B}{r_3};$$

da cui: $$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}.$$

Dunque: *La conducibilità di un fascio di conduttori congiunti in derivazione è uguale alla somma delle conducibilità dei singoli conduttori.*

b_2) In particolare, se si dispongono in derivazione n conduttori omogenei, di identiche dimensioni e formati della stessa sostanza, e se si chiama r la resistenza di uno di essi ed R la resistenza complessiva del fascio, si avrà:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \ldots + \frac{1}{r} = \frac{n}{r},$$

da cui: $$R = \frac{r}{n};$$

ossia la resistenza di questo fascio è l'$n.^{ma}$ parte di quella di ogni singolo conduttore.

Ora, questo fascio di fili conduttori fa lo stesso ufficio di un unico filo di sezione n volte maggiore; risulta così che un filo di sezione n volte più grande di un altro ha una resistenza n volte più piccola.

Ossia, *la resistenza di un conduttore omogeneo e di sezione uniforme è inversamente proporzionale alla sua sezione.*

c) Ma la resistenza elettrica, oltre che dipendere dalle dimensioni geometriche del conduttore, dipende notevolmente dalla natura di questo. Infatti, se chiudiamo successivamente per breve tempo il circuito di una pila mediante due lunghi fili delle stesse dimensioni (uno di rame e l'altro di ferro), un galvanometro inserito nel circuito indica nel primo caso una corrente più intensa che nel secondo.

Si è dato quindi il nome di *resistenza specifica* di una data sostanza alla *resistenza di un cilindretto di quella sostanza, avente un centimetro di lunghezza ed un centimetro quadrato di sezione.*

Le misure dimostrano che l'argento è il miglior conduttore di tutti i metalli, ossia quello che ha la resistenza specifica più

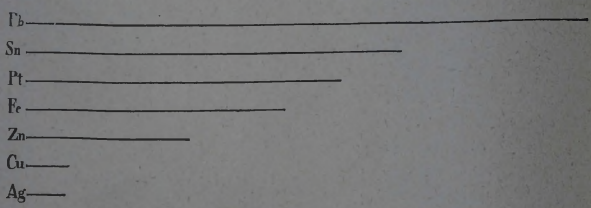


Fig. 341

piccola; poi viene il rame, che è il materiale ordinariamente usato per tutte le condutture elettriche; in seguito, a notevole distanza, gli altri metalli, sempre più resistenti.

Nella figura 341 sono paragonate, mediante segmenti di varia lunghezza, le resistenze specifiche dei metalli più comuni.

Possiamo riassumere le leggi or ora trovate sulla resistenza elettrica, colla formula:

$$r = k \frac{l}{s}, \qquad (7)$$

dove r è la resistenza del conduttore cilindrico che si considera, k è la resistenza specifica del materiale di cui è formato, l la sua lunghezza, ed s l'area della sua sezione trasversale.

Si noti però che k — e quindi anche r — è costante soltanto quando si mantiene fissa la temperatura. Se questa cresce, la resistenza — per i conduttori metallici — cresce pure, in modo sensibile.

349 — Resistenza interna della pila. — Quanto abbiamo esposto fin qui può riferirsi anche alla resistenza presentata dagli elettroliti.

Così, ad es., la resistenza complessiva di un voltametro sarà la somma di quella (assai piccola) degli elettrodi e di quella della colonna di liquido conduttore *fra essi* interposta: quindi *più piccoli e più distanti* saranno gli elettrodi, *più grande* sarà la resistenza.

Anche una pila, nello stesso modo, ha una resistenza che dipende dall'estensione dei poli, dalla loro distanza, e dalla natura e dalla concentrazione delle soluzioni: tale resistenza vien chiamata *resistenza interna della pila*.

Perchè dunque si possano ottenere correnti intense, conviene, nel costruire una pila, dare ai poli la superficie più grande che è possibile; e perciò si formano sovente con lamine avvolte a cilindro. Con questo però — va ben ricordato — si diminuisce bensì la resistenza interna, ma non si aumenta la forza elettromotrice della pila, perchè questa dipende soltanto (§ 262) dalle soluzioni e dalla natura degli elettrodi.

La resistenza interna è notevole nelle pile che posseggono il vaso poroso.

350 — Reostati. — Siccome, per quanto abbiam visto poco fa, l'intensità della corrente data da una pila varia col mutare della resistenza del circuito, si è cercato di costruire degli apparecchi che servano a cambiare a piacere detta resistenza. Ad essi si è dato il nome di *reostati*.

Sono ordinariamente formati da un filo conduttore di notevole resistenza specifica, molto lungo, ed avvolto in parecchie spirali congiunti in serie. Facendo attraversare dalla corrente o 1 spirale, o 2, o 3, ecc., ossia facendo entrare la corrente da *A* (fig. 342) e facendola uscire o da *B*, o da *C*, o da *D*, ecc., l'intensità di corrente decresce a grado a grado in tutto il circuito.

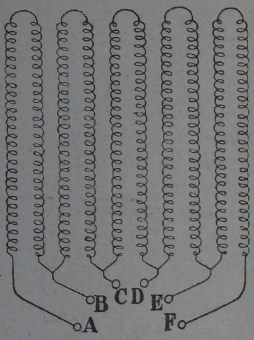


Fig. 342

Per gli usi scientifici — quando si ha da fare con correnti molto deboli — si adoprano reostati speciali, le cui spirali, di resistenza ben nota, son racchiuse nell'interno di una cassetta. Perciò questi reostati si chiamano *cassette di resistenza* (fig. 343).

351 — Voltmetri. — Dalla stessa definizione di resistenza si ricava un metodo comodo per la misura della differenza di potenziale tra due punti *A*, *B* (fig. 344) di un conduttore percorso da corrente. Congiungiamo difatti *A* e *B* con un filo *r* (fig. 345) di *grandissima* resistenza.

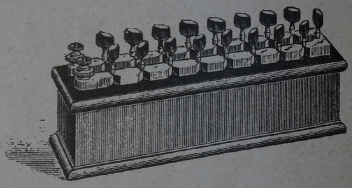


Fig. 343

In tal caso la corrente che circola per *r* è *debolissima*,

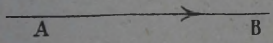


Fig. 344

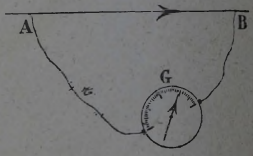


Fig. 345

e quindi la corrente che passa per il tratto *A B* del circuito non avrà mutato di valore sensibilmente.

Perciò non sarà sensibilmente cambiata neppure la differenza di potenziale fra *A* e *B*.

Ora, misuriamo con un sensibile galvanometro G l'intensità i della corrente che circola in r. Se R è la resistenza complessiva del filo e del galvanometro, e se v_A e v_B sono i valori del potenziale in A e B, avremo per formula (6) del § 347:

$$v_A - v_B = R\ i.$$

Quindi, se R è conosciuto, si otterrà immediatamente la differenza $v_A - v_B$. In pratica, invece del filo e del galvanometro insieme, si può usare semplicemente un galvanometro di *resistenza grandissima*.

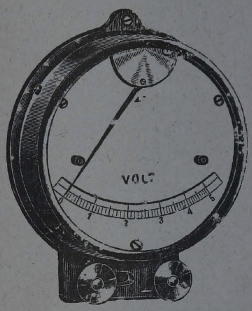


Fig. 346

A un apparecchio, il quale serva in tal modo a misurare le differenze di potenziale, si dà il nome di *voltmetro* (fig. 346).

Negli usi industriali la misura dei potenziali si fa appunto, ordinariamente, coi voltmetri.

352 — Legge di Ohm. — Però il valore che assume l'intensità della corrente fornita da una pila dipende — oltre che dalla resistenza dei fili conduttori — anche dalla resistenza interna e dalla forza elettromotrice della pila stessa. Cerchiamo qual' è la relazione che lega fra loro queste grandezze.

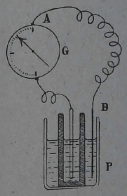


Fig. 347

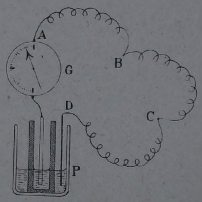


Fig. 348

a) Anzitutto prendiamo una pila P, ad es. di Daniell (fig. 347), e chiudiamone il circuito per pochi istanti, mediante

un lungo filo $A\ B$ e un galvanometro G. Se quest' ultimo è tarato, dalla deviazione dell' ago si desume subito l' intensità della corrente.

Inseriamo quindi, nello stesso circuito, altri due pezzi di filo conduttore: uno, BC (fig. 348), identico ad AB, e l' altro CD, di resistenza uguale a quella del galvanometro. E contemporaneamente riduciamo a metà ognuno dei due liquidi della pila, in guisa che la resistenza di questa diventi doppia. In tal modo abbiamo raddoppiato la resistenza complessiva del circuito. Orbene, si trova che la intensità di corrente è ridotta a metà di quella di prima.

Se triplicassimo la resistenza complessiva di tutto il circuito, l'intensità di corrente diventerebbe $\frac{1}{3}$; e così di seguito.

Dunque risulta che *l' intensità della corrente è inversamente proporzionale alla resistenza totale del circuito.*

b) Ora, lasciando il circuito esterno come adesso si trova, riportiamo i liquidi al primitivo livello: ed aggiungiamo poi — in serie con P — un altro elemento P' (fig. 349) identico a P.

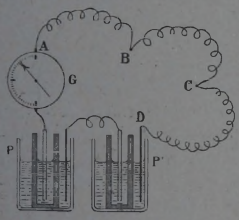


Fig. 349

In queste condizioni il circuito contiene una forza elettromotrice doppia (§ 262); e la sua resistenza totale è uguale a quella che si aveva nel caso della figura 348. Ora, il galvanometro ci mostra che l'intensità di corrente risulta doppia di quella che si aveva allora.

Analogamente, se si disponesse di una forza elettromotrice n volte maggiore, si avrebbe — a parità di resistenza totale del circuito — una corrente n volte più intensa.

E perciò concluderemo che *l' intensità della corrente data da una pila è direttamente proporzionale alla forza elettromotrice della pila stessa.*

Riunendo i risultati ottenuti, possiamo enunciare la seguente legge, dovuta al fisico Ohm: *l' intensità di una corrente elettrica è proporzionale direttamente alla forza elettromotrice, ed inversamente alla resistenza totale del circuito.*

Se indichiamo con i l'intensità della corrente, con e la f. e. m., con ρ la resistenza interna della pila, e con r quella della parte rimanente di circuito, si avrà:

$$i = k \frac{e}{r + \rho},$$

dove k è un coefficiente costante. Però le unità elettriche *ampère, volta, ohm* sono state scelte e collegate in tal modo fra loro, che alla costante k risulti il valore 1. Dunque la *legge di Ohm* viene espressa dalla formula:

$$i = \frac{e}{r + \rho}. \qquad (8)$$

Essa ci permette di calcolare il valore di una qualunque delle quantità che vi figurano, quando sian note le altre.

Effetti termici della corrente.

353 — La corrente elettrica che percorre un circuito produce — come accennammo — anche dei fenomeni termici, sviluppando nei conduttori che essa attraversa una quantità più o meno grande di calore.

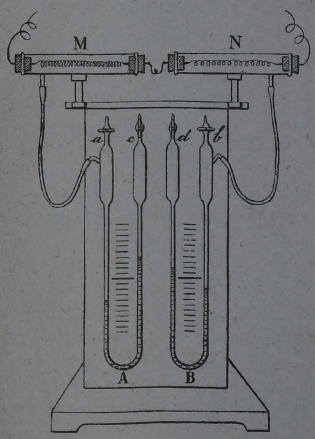


Fig. 350

Se, infatti, teniamo chiuso per un certo tempo il circuito di una pila — specialmente se formata di parecchi grossi elementi riuniti in quantità — si trova che il filo metallico attraversato dalla corrente, si è sensibilmente riscaldato.

È utile ricercare come varî, a seconda delle condizioni elettriche del circuito, la quantità di calore sviluppato dalla corrente.

Ci servirà bene a tale scopo l'apparecchio della figura 350. È costituito da due tubi manometrici ad U, ripieni a metà di

un liquido colorato, e terminanti ad ogni estremità con un rigonfiamento chiuso da un rubinetto. Mediante due tubi di gomma, si mettono il primo e l'ultimo ramo dei manometri in comunicazione rispettivamente colle canne di vetro *M* ed *N*, in cui sono rinchiuse due spirali di filo metallico di notevole resistenza elettrica. I rubinetti *a* e *b* son chiusi; invece *c* e *d* si tengono aperti.

354 — Lo sviluppo di calore in un conduttore è proporzionale alla sua resistenza elettrica. — Facciamo anzitutto variare la resistenza del conduttore percorso dalla corrente. Per ciò prenderemo la spirale *M* di resistenza doppia dell'altra, formandola, per es., con un filo identico ma di lunghezza doppia. Disposte in serie le spirali, facciamole attraversare dalla corrente elettrica per alcuni istanti. Si vedrà che in ognuno dei manometri il liquido subisce un dislivello: ma nel manometro *A* congiunto con *M*, tale dislivello risulta doppio che nel manometro *B*.

Se la resistenza della spirale contenuta in *M* fosse stata tripla di quella della spirale di *N*, si sarebbe osservato nel primo manometro un dislivello triplo che nel secondo. E così di seguito.

Se ne conclude che *lo sviluppo di calore è proporzionale alla resistenza elettrica del conduttore.*

355 — Lo sviluppo di calore in un conduttore è proporzionale al quadrato dell'intensità della corrente. — Per trovare adesso come la quantità di calore che si svolge dipenda dall'intensità della corrente, prepariamo tre spirali identiche, *M*, *N*, *P* (fig. 351) contenute in canne di vetro come quelle di poco fa. Disponiamole in due rami derivati, in modo che uno di essi, *SNT*, verrà ad avere resistenza metà dell'altro, *SMPT*. Stabiliamo per un certo tempo fra *S* e *T* una differenza di potenziale, di guisa che i due rami saranno attraversati da una corrente. Per la definizione da noi data (§ 347) di resistenza elettrica, nel ramo *SMPT*, ch'è di resistenza doppia, si avrà una intensità di corrente metà che nell'altro ramo.

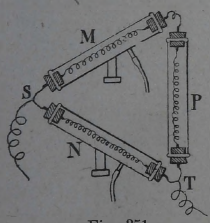


Fig. 351

Orbene, questa volta il manometro A ch' è congiunto con M subisce un dislivello quattro volte più piccolo di quello che subisce il manometro B congiunto con N.

Se poi, aggiungendo nel ramo $SMPT$ una nuova spirale identica alle altre, facessimo in modo che la spirale M fosse percorsa da una corrente tre volte meno intensa di quella che circola per N, allora si troverebbe che il dislivello nel manometro A sarebbe 9 volte minore che in B. Questo dimostra che *lo sviluppo di calore in un conduttore è proporzionale al quadrato dell' intensità della corrente.*

356 — **Legge di Joule.** — Alle conclusioni precedenti si può aggiungere l' altra — evidente di per sè — che *la quantità di calore sviluppata in un conduttore è proporziozionale al tempo per cui è durato il passaggio della corrente elettrica.*

E allora tutti i risultati ottenuti si possono raggruppare nella seguente legge enunciata da Joule, e detta perciò *legge di Joule:*

La quantità di calore svolta in un conduttore in un intervallo di tempo è proporzionale a questo tempo, alla resistenza del conduttore, ed al quadrato dell' intensità della corrente.

Indicando dunque con Q la quantità di calore svolta nel tempo t in un conduttore di resistenza r da una corrente elettrica d' intensità i, si ha la formula

$$Q = k.\ i^2\ r.\ t, \tag{9}$$

dove il coefficiente k dipende dalle unità di misura che si scelgono.

Ora, alla quantità di calore Q corrisponde una determinata quantità di energia, che chiamiamo W; e se E indica l' equivalente meccanico del calore (§ 99) si ha la relazione

$$W = E.\ Q.$$

Quindi

$$W = Ek.\ i^2\ r\ t.$$

Se ora diamo a k un conveniente valore, in modo che sia $Ek = 1$, si avrà

$$W = i^2\ r\ t; \tag{10}$$

ed allora — esprimendo i, r, t rispettivamente in *ampère*,

ohm, *secondi* — l' energia W verrà ad essere espressa in una unità chiamata *joule*, che è uguale a 10^7 *erg* (Vol. I, § 135).

Una piccola caloria equivale a 4,2 joule.

Applicazioni degli effetti termici della corrente.

357 — Lampade elettriche ad incandescenza. — Il calore svolto nei conduttori dal passaggio della corrente ha ricevuto una importante applicazione nella luce elettrica.

Secondo la legge di Joule, il calore che si manifesta in un filo percorso dalla corrente è proporzionale alla resistenza elettrica di questo. Se usiamo quindi un filo molto sottile, il calore che vi si svolge può esser tale da arroventarlo e anche da fonderlo; ed evidentemente una corrente di opportuna intensità può mantenere il filo allo stato di incandescenza, somministrandogli continuamente il calore che esso via via emette tutto attorno per irraggiamento.

Il filo allora può servire come sorgente luminosa. Conviene però fare in modo che la sostanza costituente il filo non si combini — a quell' alta temperatura — coll' ossigeno atmosferico: e a questo si può provvedere tenendo il filo in una ampolla di vetro da cui si estrae l' aria.

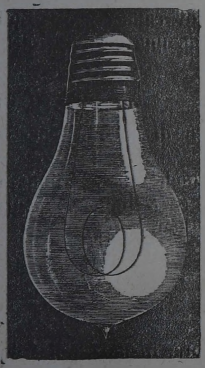


Fig. 352

In tal modo si ottiene una *lampada elettrica*. Infatti essa — come è ormai a tutti noto — è costituita da un globetto di vetro (fig. 352) contenente un sottile filamento di carbone — ordinariamente ricurvo — i cui capi sono uniti a due fili di platino saldati nel vetro e destinati a condurre la corrente. Nell' interno è stato praticato un vuoto molto spinto. Ad un' estremità poi del palloncino è stata applicata una ghiera d' ottone, formata di due parti, isolate fra loro, e comunicanti rispettivamente coi due fili di platino: una di queste parti è foggiata a vite, e permette di avvitare la lampada in un apposito *portalampade*, al quale arrivano i fili adduttori della corrente.

Le lampade elettriche ad incandescenza emettono una luce gradevole per parecchie centinaia di ore. Però a poco a poco il

vetro internamente si annerisce per la deposizione di carbone che volatilizza dal filamento, e questo alla fine si rompe.

Fig. 353

Recentemente sono entrate nell' uso anche lampade ad incandescenza con filamento metallico, molto superiori, per il loro rendimento luminoso, a quelle con filamento di carbone. Il loro filo è costituito, a seconda dei casi, di osmio, o tantalio, o tungsteno: avendo però una resistenza specifica non molto grande, deve esser di notevole lunghezza, e quindi viene ripiegato più volte in varie foggie (fig. 353).

La fragilità tuttavia di questi filamenti ed il prezzo più elevato di queste lampade hanno finora impedito la loro completa sostituzione alle lampade a filamento di carbone.

358 — **Lampade ad arco.** — Un rendimento ancora migliore in luce si può ottenere colle *lampade ad arco*.

L' *arco elettrico* o *arco voltaico*, scoperto dal Davy nel 1836, si ottiene facilmente accostando fino al contatto, e poi subito allontanando alquanto, due cilindri di carbone di storta che si mantengano ad una differenza di potenziale di una cinquantina di volta. La scintilla che si forma tra i carboni all' istante del loro distacco, provoca, per l' alta sua temperatura, la vaporizzazione del carbone; i vapori formatisi nel breve intervallo d' aria mantengono ancora il passaggio della corrente, e così, col calore intenso che questa sviluppa, la vaporizzazione continua. Si ha in tal modo una fiamma che congiunge i due carboni (fig. 354), e questi, mantenuti incandescenti, emettono una luce vivissima.

Fig. 354

Ma i cilindri di carbone si consumano, e l' arco così diviene via via più lungo: quando esso ha raggiunto una certa lunghezza, per

l' accresciuta resistenza s' interrompe, ossia si spegne, e per riaccenderlo bisogna ricominciare, come prima, dal porre i carboni a contatto. Nelle *lampade ad arco* però, per ottenere l' accensione, e per mantenere i due carboni ad opportuna distanza nonostante che gradualmente si consumino, si hanno opportuni congegni detti *regolatori*.

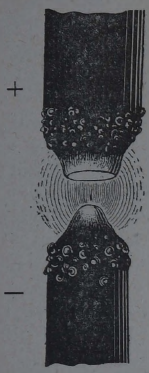


Fig. 355

Dopo un certo tempo che un arco sta acceso, i suoi carboni assumono aspetti notevolmente diversi: quello positivo — come mostra la figura 355 — risulta incavato a cratere, e si riscalda e si consuma più di quello negativo, il quale diventa invece appuntito. Per tale ragione conviene, nelle lampade ad arco, tenere i carboni verticalmente, con quello positivo — che si fa più grosso — al di sopra, affinchè il suo cratere incandescente proietti la luce verso il basso.

Le lampade ad arco, essendo sorgenti di luce molto intensa, ma assai incostante, sono generalmente usate per l'illuminazione stradale e per ambienti molto vasti.

359 — Altre applicazioni. — Il calore svolto dalle correnti elettriche è stato pure utilizzato pel *riscaldamento* degli ambienti e per svariati usi domestici. Si adoperano a questo scopo delle spirali di fili molto resistenti, avvolte su sostegni isolanti e incombustibili. Si costruiscono così delle stufe elettriche, dei fornelli da cucina, dei ferri da stirare; ma questi apparecchi sono poco diffusi, a causa del costo tuttora elevato dell' energia elettrica.

Un' altra applicazione della legge di Joule — modesta, ma di grande utilità — è quella che se ne fa nelle *valvole fusibili*. Sono esse laminette, oppure fili, di piombo o di altro metallo facilmente fusibile, che si intercalano nel circuito degli impianti di illuminazione elettrica, e più in generale negli impianti industriali di utilizzazione dell'energia elettrica. Se la corrente che le attraversa si fa ad un tratto — per una cagione qualsiasi — troppo intensa, il calore che si sviluppa in queste valvole è sufficiente a fonderle; e in tal modo s' interrompe bruscamente il circuito, evitando i danni che la corrente, per la sua eccessiva intensità, recherebbe agli apparecchi che attraversa.

Infine accenneremo fugacemente anche al *forno elettrico*, nel quale si raggiunge una elevatissima temperatura (fin verso i 4000 gradi), utilizzando il calore svolto nell'arco voltaico.

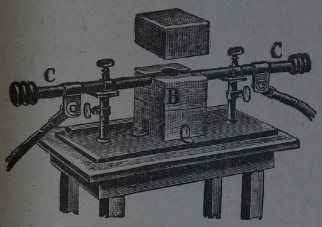


Fig. 356

L'arco si fa avvenire fra due carboni *CC* (fig. 356), nell'interno di un crogiuolo di grafite o di un blocco *B* di terra refrattaria, dove si mettono le sostanze da sottoporre a quella potente azione calorifica.

Nel forno elettrico quasi tutti i corpi si fondono: di più, le sostanze composte, allo stato di fusione, attraversate così dalla corrente, subiscono l'elettrolisi, come se fossero in soluzione. In tal modo si son realizzati importanti processi, coi quali è stato possibile, ad es., ottenere a buon prezzo l'alluminio, fabbricare il carburo di calcio, il carborundum, fissare l'azoto atmosferico nella produzione di concimi artificiali per uso agricolo, dare insomma origine e vita a tante nuove e preziose industrie di cui va altera la moderna elettrochimica.

Fenomeno Peltier.

360 — Un altro effetto termico dovuto alla corrente, è il così detto *fenomeno Peltier*, che può considerarsi come il reciproco del fenomeno da noi già studiato nella Termoelettricità (§ 294).

Abbiamo veduto allora che scaldando una delle giunture di una catena chiusa formata con metalli diversi, si genera una f. e. m. che dà luogo ad una corrente. Orbene, se reciprocamente facciamo passare una corrente per cotesta catena, le giunture si scaldano o si raffreddano, a seconda del senso della corrente. Più precisamente, in una data giuntura si ottiene un riscaldamento se la corrente ha il senso opposto a quello della corrente termoelettrica che si produrrebbe scaldando la giuntura stessa; si ha un raffreddamento nel caso contrario.

Le correnti termoelettriche che così si originano dal fenomeno Peltier sono dunque contrarie alla corrente originaria.

Energia elettrica.

361 — Varie espressioni dell' energia elettrica. — Il calore che una corrente elettrica svolge lungo il suo percorso, deve — in base al principio di conservazione dell' energia — risultare dalla trasformazione di una energia posseduta dalla corrente medesima: si dà ad essa il nome di *energia elettrica*.

L' energia elettrica è dunque espressa dalla formula (10) del § 356:

$$W = i^2rt.$$

Si può dare a questa formula anche un aspetto più semplice. Infatti, si chiami v la *differenza* di potenziale fra i capi A e B del conduttore considerato — differenza che al § 347 è stata indicata con $v_A - v_B$. — Allora, per la formula (6) dello stesso paragrafo, si avrà:

$$v = ir;$$

e se quindi sostituiamo v al prodotto ir nella (10), si ottiene:

$$W = vit. \qquad (11)$$

Ora, si chiama *potenza di una corrente elettrica in un dato conduttore, l'energia di cui essa può disporre nell'unità di tempo*. Quindi la formula (11) fornisce una regola facile per calcolare la potenza di una corrente d' intensità i, che percorre un conduttore i cui estremi hanno una differenza di potenziale v: basta moltiplicare l' intensità per la differenza di potenziale.

L' unità di potenza — detta *watt* — *è quella che corrisponde all' energia di 1 joule per secondo*. Nell' industria si usa il *kilowatt*, ch' è 1000 volte maggiore.

Perciò, se esprimiamo l' intensità i in ampère, e la differenza di potenziale v in volta, il prodotto $v\,i$ dà la misura della potenza espressa in watt, perchè esso rappresenta appunto il numero di joule spesi dalla corrente in un secondo.

Dall' espressione dell' energia elettrica possiamo dedurre una conseguenza importante, servendoci della formula (5) del § 339. Conformemente ad essa sostituiamo al prodotto it, nella (11), la quantità q di elettricità passata nel tempo t; si ottiene allora:

$$W = vq, \qquad \text{od anche:} \qquad v = \frac{W}{q}. \qquad (12)$$

Questa formula si può interpretare dicendo che *la differenza di potenziale fra due punti di un conduttore percorso da corrente è numericamente misurata dal lavoro necessario per portare lungo il conduttore l'unità di carica elettrica dall'un punto all'altro.*

Campo elettrico.

362 — **Forza elettrica.** — Analoga conclusione noi adesso trarremo pel lavoro che è necessario al trasporto dell'unità di carica da una posizione qualunque ad un'altra dello spazio, in contrasto colle forze di attrazione o di repulsione che tal carica risente dai corpi elettrizzati circostanti.

Intanto a queste forze scambievoli di attrazione o di repulsione daremo il nome di *azioni elettriche*. E chiameremo poi *campo elettrico una regione dello spazio nella quale siano sensibili delle azioni elettriche.*

Invero, sebbene teoricamente un corpo elettrizzato dovrebbe far risentire la sua azione — per quanto debole — fino a distanze infinitamente grandi, pure il campo elettrico da esso prodotto sarà in pratica limitato sensibilmente ad una certa regione circostante al corpo.

Ora, in un punto qualunque di un campo elettrico, originato da uno o più corpi elettrizzati, immaginiamo portato un corpuscolo carico coll'unità di elettricità positiva: la forza di attrazione o di repulsione cui esso è sottoposto per parte dei corpi elettrizzati che danno origine al campo, dicesi *forza elettrica* in quel punto del campo o *intensità del campo* in quel punto. Tale forza è naturalmente caratterizzata dalla sua *intensità* e dalla sua *direzione*.

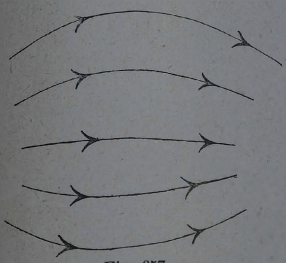


Fig. 357

Analogamente poi a quanto è stato spiegato pel campo magnetico (§ 321), anche in un campo elettrico possono considerarsi le *linee di forza* (fig. 357): la tangente a una di queste

linee in un punto qualunque — come vedemmo nel magnetismo — ha la direzione che ha l' intensità del campo in quel punto.

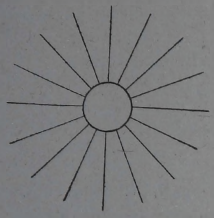


Fig. 358

Una linea di forza è dunque la linea che seguirebbe un corpuscolo carico dell' unità di elettricità positiva, perfettamente libero di muoversi e senza inerzia.

Le linee di forza nel campo prodotto da una unica sfera elettrizzata sono rette che irraggiano in tutte le direzioni (fig. 358).

363 — Il lavoro necessario al trasporto di una carica è indipendente dalla strada che si segue. — Esploriamo adesso un campo elettrico nei varî suoi punti, portando in essi un corpuscolo carico di una quantità di elettricità q.

Supporremo che tale carica q sia così piccola, da non disturbare in maniera sensibile la distribuzione dell' elettricità sul conduttore, e da non variare sensibilmente la capacità di questo, qualunque sia la posizione relativa dei due corpi.

Orbene, si dimostra che il lavoro necessario a trasportare la carica q da un punto ad un altro del campo non dipende dalla strada seguita, nè dal metodo adoperato.

Infatti, proviamo invece a supporre che il lavoro compiuto quando la carica q percorre il cammino PAQ (fig. 359) sia, ad es., maggiore di quando percorre il cammino PBQ. Allora, poichè il lavoro speso dalle forze elettriche quand' essa va da P a Q lungo il cammino PBQ è uguale al lavoro che noi dobbiamo compiere per portare la carica stessa da Q a P lungo QBP, si vede che — facendo percorrere alla carica la curva chiusa $PAQBP$ — il lavoro che ricaviamo, a spese delle forze elettriche, quand' essa percorre il primo tratto PAQ sarebbe nella nostra ipotesi maggiore del lavoro speso da noi nel riportarla indietro da Q a P lungo QBP. Così, dunque, quella quantità di elettricità sarebbe riportata al punto di partenza ed avremmo guadagnato lavoro.

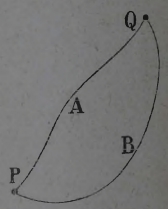


Fig. 359

L' ipotesi invece che lungo PAQ occorra un lavoro minore, condurrebbe a trovare una perdita di lavoro.

E conseguenze analoghe si hanno dal supporre che il lavoro occorrente al trasporto da P a Q per un dato cammino sia diverso secondo la maniera con cui si eseguisce il trasporto.

Siccome un guadagno o una perdita di lavoro contraddicono al principio di conservazione dell' energia, dobbiamo concludere, dunque, che *il lavoro fatto spostando una carica elettrica da un punto ad un altro non dipende dalla strada seguita, nè dalla maniera come si eseguisce lo spostamento.*

364 — **Estensione del concetto di potenziale.** — Prendiamo ora a considerare, in un campo elettrico, due conduttori elettrizzati; e sia v la loro differenza di potenziale.

Se congiungiamo i due conduttori con un filo metallico, spontaneamente si forma una corrente che trasporta elettricità positiva dal conduttore a potenziale più alto verso quello a potenziale più basso. Ed abbiamo concluso (§ 361) che la differenza di potenziale v tra i due conduttori è misurata numericamente dal lavoro compiuto dalla corrente nel trasportare l' unità di carica dall' uno all' altro.

Adesso però — per quanto si è detto al precedente paragrafo — possiamo aggiungere che si richiede il medesimo lavoro anche se questo trasporto avviene in qualsiasi altro modo e per un cammino qualunque: e quindi la differenza di potenziale tra i due *conduttori* è misurata dal lavoro ch' è necessario *in ogni caso* per trasportare la carica unitaria da un punto dell' uno ad un punto dell' altro.

Per analogia, apparisce naturale estendere ai *punti* di un campo elettrico il concetto di *potenziale*, che al § 259 abbiamo definito soltanto pei *conduttori* elettrizzati.

In generale dunque diremo che la *differenza di potenziale tra due punti di un campo elettrico è misurata dal lavoro che si deve compiere per portare l' unità di elettricità positiva dall' uno all' altro.*

Per lo spostamento di una carica q si richiederà un lavoro W che è q volte maggiore.

Varrà quindi, anche pei punti di un campo, la formula

$$W = c\,q,$$

che al § 361 abbiamo trovato come espressione dell' energia posseduta da una corrente elettrica. Colla nuova definizione abbiamo notevolmente esteso la sua validità e la sua importanza.

Induzione elettromagnetica.

365 — Flusso di forza concatenato con un circuito. — Ora passiamo a studiare nuovi fatti, importantissimi, che ci dimostrano sempre più l' intimo nesso fra i fenomeni elettrici e quelli magnetici.

Abbiamo a suo tempo definito (§ 324) il flusso di forza attraverso ad una data superficie posta in campo magnetico, come il numero di linee di forza che passano per quella superficie.

Adesso consideriamo invece, nel campo magnetico, un filo conduttore formante un circuito chiuso, ed una superficie qualunque tesa nel suo interno e limitata tutto attorno da quel conduttore.

Allora al flusso di forza che attraversa tale superficie daremo il nome di *flusso di forza concatenato col circuito.*

E ciò, facendo astrazione dalle cause che generano il campo magnetico.

366 — Coefficienti d'induzione. — Merita però considerazione speciale il caso in cui il campo magnetico sia creato da una corrente elettrica. Noi sappiamo già (§ 334) che l' intensità di siffatto campo è in ogni punto proporzionale all' intensità della corrente. Se dunque questa diventa 2, 3, ... n volte più grande, il campo magnetico in ogni punto diventa pure 2, 3,... n volte più intenso, e così anche il flusso di forza che attraversa una data superficie del campo.

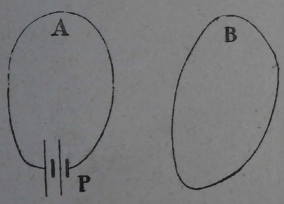


Fig. 360

Sia, ad es., A (fig. 360) un circuito percorso dalla corrente elettrica prodotta dalla pila P, e sia B un altro circuito metallico chiuso. Chiamando allora i l' intensità della corrente in A, e Φ il flusso di forza magnetica concatenato col circuito B, si avrà:

$$\Phi = M.i, \qquad (13)$$

dove M indica un opportuno coefficiente di proporzionalità. Questo coefficiente ha ricevuto il nome di *coefficiente d'induzione mutua* dei circuiti A e B. Esso dipende dalla forma, dalle dimensioni e dalla mutua posizione di A e di B; e l'esperienza c' insegna che facendo percorrere alla corrente d' intensità i il circuito B invece che A, il flusso di forza concatenato ora con A viene ad avere il medesimo valore Φ, ossia è proporzionale ad *i col medesimo coefficiente M di proporzionalità.*

Si può dunque definire il coefficiente d' induzione mutua di due circuiti come *il flusso di forza concatenato con uno di essi quando l'altro è percorso dalla corrente d' intensità unitaria.*

Ma quando la corrente percorre A, le linee di forza del campo magnetico prodotto attraversano tutte anche il circuito A stesso. E quindi, chiamando Φ' il flusso di forza concatenato con A, si avrà pure analogamente:

$$\Phi' = L \, . \, i \, , \tag{14}$$

dove con L si è indicato un altro coefficiente di proporzionalità al quale si è dato il nome di *coefficiente di autoinduzione* del circuito A. Così, ad ogni circuito compete un suo proprio coefficiente di autoinduzione, determinato solo dalla sua configurazione geometrica. E si può definirlo come *il flusso di forza concatenato col circuito, quando questo è percorso dalla corrente d' intensità unitaria.*

Se il filo costituente il circuito è avvolto a forma di solenoide (fig. 361), allora il flusso concatenato con questo circuito deve essere proporzionale alla superficie totale che esso racchiuderebbe svolgendo le spire, e quindi per tal ragione deve essere proporzionale al numero delle spire ed all' area racchiusa da ognuna di esse. D'altronde, se le spire sono ben serrate fra loro, il flusso prodotto da ciascuna spira attraversa tutte le altre; e quindi il flusso totale avrà un valore uguale a quello del flusso che attraverserebbe la superficie totale delle spire, moltiplicato pel numero delle spire stesse.

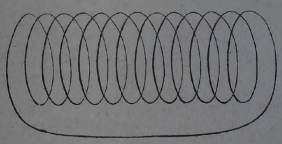


Fig. 361

Dunque il flusso totale concatenato con un tal circuito risulta proporzionale all' area di ognuna delle spire ed al quadrato del loro numero. E per conseguenza anche *il coefficiente di autoinduzione del solenoide risulta proporzionale al quadrato del numero delle spire ed alla loro sezione.*

Se poi introduciamo nel selenoide o rocchetto un nucleo di ferro, allora — a causa della grande permeabilità di questo — le linee di forza nell' interno diventano molto più fitte. Così il coefficiente d' autoinduzione viene enormemente accresciuto.

367 — Fenomeni di induzione elettromagnetica. — Facciamo ora in modo da aumentare ad un tratto il flusso di forza concatenato con un dato circuito chiuso *B* (fig. 362) che non contiene alcuna forza elettromotrice.

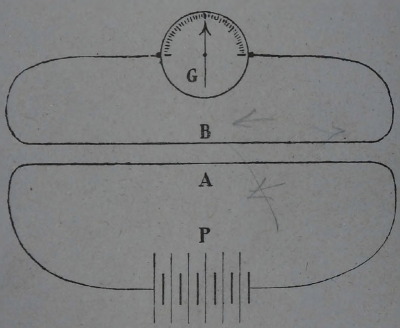


Fig. 362

Questo risultato si può ottenere in più modi: o avvicinando a *B* un altro circuito chiuso *A*, percorso dalla corrente di una pila *P*, oppure tenendo fissi ambedue i circuiti e stabilendo ad un tratto la corrente in *A* col chiuderne il circuito, o infine semplicemente aumentando l' intensità di questa corrente.

Se un galvanometro, *G*, è incluso in *B*, vediamo tosto una leggiera deviazione dell' ago, che ci rivela il passaggio in *B* di una subitanea corrente: essa dura soltanto per il tempo in cui il flusso concatenato con *B* cresce, ed è di senso contrario alla corrente che circola in *A*.

Appena il flusso concatenato con B ha raggiunto il valore definitivo, anche se molto grande, la corrente in B cessa.

Questo fenomeno si chiama *induzione elettromagnetica*, e fu scoperto da Faraday; il circuito A si dice *inducente* o *primario*, il circuito B *indotto* o *secondario*, e le correnti che in questo si originano son chiamate *correnti indotte*.

Ora facciamo invece diminuire ad un tratto il flusso concatenato con B: o allontanando i due circuiti, o interrompendo la corrente in A, od anche soltanto rendendola più debole.

Noteremo nel galvanometro G una nuova deviazione, di senso inverso alla precedente. Dunque una diminuzione del flusso concatenato col circuito B ha prodotto in questo — e soltanto pel tempo in cui è durata questa diminuzione — una corrente indotta, dello stesso senso della corrente inducente.

Effetti molto più marcati si ottengono avvicinando molto i due circuiti e disponendo un lungo tratto del circuito indotto parallelamente ad un altro tratto del circuito inducente.

Ciò si ottiene con comodità, avvolgendo l'uno e l'altro filo su due rocchetti S, S', (fig. 363); uno di essi, S, congiunto alla pila P, può esser contenuto entro l'altro, S', che è colle-

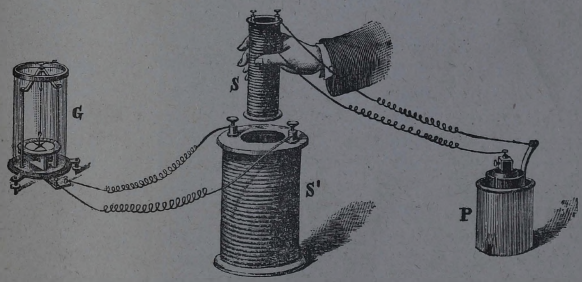


Fig. 363

gato ad un galvanometro G. Quando S s'introduce in S', o se ne estrae, il galvanometro devia.

Infine, lo stesso fenomeno di induzione può anche prodursi sostituendo al rocchetto S percorso dalla corrente una calamita di acciaio: anche in tal modo, infatti, si varia il flusso di forza concatenato col circuito di S'.

E per conseguenza si otterrà un'azione complessiva ancor più intensa, se introduciamo in S', oltre al rocchetto S attraversato dalla corrente, anche un magnete che gli serva di nucleo. Basterà anzi adoperare un semplice cilindro di ferro dolce, perchè esso assume (§ 342) proprietà di calamita appunto per essere avvolto dal rocchetto S.

368 — Legge di Lenz. — Se si tien conto delle azioni elettrodinamiche (§ 345), i fenomeni di induzione elettromagnetica possono essere espressi, qualitativamente, dalla *legge di Lenz*, che si enuncia nel modo seguente:

Ogni volta che si fa muovere un circuito percorso dalla corrente, in vicinanza di un altro circuito chiuso, si desta in quest' ultimo una corrente di senso tale, da opporsi al movimento che l' ha prodotta.

Difatti, *avvicinando* una corrente ad un circuito chiuso, si desta in esso una corrente contraria all'inducente: e tali due correnti tendono ad *allontanarsi* (§ 345). E *allontanando* invece una corrente da un circuito chiuso, si desta in questo una corrente dello stesso senso dell'inducente, alla quale esso tende ad *avvicinarsi*.

369 — Estracorrenti. — La legge secondo cui una variazione del flusso concatenato con un circuito, origina in questo una corrente d'induzione è una legge generale. Per ora noi l'abbiamo verificata mediante variazioni di un flusso di forza che era prodotto da cause esterne al circuito indotto. Ma la legge dell'induzione vale ancora per le variazioni che può subire, attraverso il circuito, il flusso prodotto dalla corrente che percorre il circuito medesimo.

Così, ad es., se si stabilisce ad un tratto il passaggio della corrente in un circuito A, il flusso concatenato con esso, partendo dal valor zero, dovrebbe *repentinamente* assumere un certo valore determinato. Ma un aumento del flusso di forza produce in A una corrente indotta di senso inverso a quella che dà origine al flusso medesimo: corrente che è chiamata *estracorrente di chiusura*. Essa, sovrapponendosi alla corrente principale, ne scema *in sul principio* l'intensità.

E analogamente, quando si sopprime la f. e. m. agente nel circuito, la corrente — e quindi il flusso di forza da essa prodotto — dovrebbe annullarsi *improvvisamente*. Ma una

diminuzione del flusso concatenato col circuito, genera in questo una corrente dello stesso senso di quella che creava il flusso medesimo: questa prende il nome di *estracorrente di apertura*. Ha per effetto di prolungare alquanto il passaggio della corrente, facendola diminuire d'intensità soltanto *gradatamente*, fino al valore zero.

Questi che qui abbiam descritto sono fenomeni di induzione di una corrente sul proprio circuito: si soglion chiamare perciò *fenomeni di autoinduzione*.

In conseguenza di essi la corrente all'atto di stabilirsi si può rappresentare con una curva saliente, come *A B* nella figura 364;

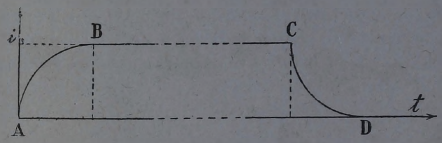


Fig. 364

la retta *B C* rappresenta lo stato di regime permanente; quando poi, in *C*, si sopprime nel circuito la f. e. m., la corrente perdura alquanto, scemando, come mostra il ramo *C D*.

Comunemente però, in luogo di sopprimere la f. e. m., si suole interrompere in un punto qualunque il circuito. Ma allora i fenomeni si complicano alquanto, poichè nel luogo dell'interruzione si forma una scintilla — detta *scintilla di autoinduzione* — che prolunga il periodo variabile della corrente.

I fenomeni di autoinduzione sono in un circuito tanto più marcati, quanto più grande è il valore del suo coefficiente di autoinduzione, che ha ricevuto tal nome appunto per questo fatto. Talora anzi — per brevità — esprimiamo questo coefficiente con la semplice parola: *autoinduzione* del circuito.

370 — **Leggi quantitative dell'induzione.** — Cerchiamo ora quali leggi quantitative governano in generale i fenomeni di induzione. Supponiamo perciò che il flusso di forza concatenato con un dato circuito passi gradatamente — durante un breve tempo t — da un valore iniziale Φ ad un valore finale Φ', ossia subisca una variazione $\Phi' - \Phi$. Si genererà allora in quel circuito una corrente di intensità i, che sovrapponendosi a quella eventualmente preesistente, la intensificherà oppure la indebolirà, a seconda del loro senso.

Se il circuito possiede complessivamente una resistenza elettrica r, allora l' intensità i potrebbe ottenersi — conformemente alla legge di Ohm (§ 352) — con una pila di resistenza interna trascurabile, la cui forza elettromotrice avesse il valore ir. Perciò al prodotto ir si dà il nome di *forza elettromotrice indotta*. Se la si indica con ε, si avrà

$$\varepsilon = ir. \qquad (\alpha)$$

La f. e. m. indotta è regolata da una legge fondamentale, che è detta *legge di Neumann* dal nome del suo scopritore, e che si enuncia così:

La f. e. m. indotta è proporzionale direttamente alla variazione del flusso di forza che la produce, e inversamente alla durata di questa variazione.

Ossia, indicando con c un coefficiente di proporzionalità dipendente dalle unità di misura, si ha la formula

$$\varepsilon = c\,\frac{\Phi' - \Phi}{t}. \qquad (15)$$

Essa ci dice che — a parità di variazione del flusso — la f. e. m. indotta è tanto più grande, quanto più rapida è la detta variazione.

D' altra parte, se q è la quantità totale di elettricità messa in moto durante tutto il tempo t per produrre la corrente indotta, la formula (5) del § 339 ci dice che $i = \frac{q}{t}$.

Dunque la (α) si può anche scrivere:

$$\varepsilon = \frac{qr}{t},$$

da cui:

$$q = \frac{t\,\varepsilon}{r}. \qquad (\beta)$$

Introducendo in (β) il valore di ε fornito dalla (15), si ha:

$$q = c\,\frac{\Phi' - \Phi}{r}. \qquad (16)$$

Questa formula ci dice che *la quantità di elettricità messa complessivamente in moto per l' induzione non dipende dalla durata della variazione del flusso: essa è proporzionale direttamente al valore di questa variazione, e inversamente alla resistenza del circuito.*

Vedremo presto quale importanza abbiano queste leggi.

371 — **Correnti di Foucault.** — Le correnti indotte non si producono soltanto in un vero e proprio circuito costituito da filo conduttore. Esse si generano parimente anche in qualunque massa metallica che sia sottoposta a variazioni di flusso di forza magnetica. E in tal caso vengono chiamate *correnti di Foucault*.

La loro esistenza può essere dimostrata in più modi: ma uno dei più evidenti consiste nel palesare il calore sviluppato da queste correnti, conformemente alla legge di Joule.

Serve bene a ciò l' apparecchio della figura 365. Mediante la manovella *m* e numerosi roteggi si fa girare il disco di rame *D* molto rapidamente fra i poli *NS* della potente elettrocalamita *R*. Allora attraverso le varie parti del disco si hanno variazioni repentine e intense del flusso di forza, al loro entrare od uscire dall' interstizio tra i due poli. Si generano quindi nella massa di rame correnti di senso tale, da opporsi — conformemente alla legge di Lenz — al movimento che le desta; per tal ragione, quando l' elettromagnete agisce, si incontra, nel far ruotare il disco, una resistenza molto grande. E le correnti che si generano nel disco medesimo sono d' altra parte così intense, che esso ben presto si scalda, pel calore Joule, ad una temperatura assai alta.

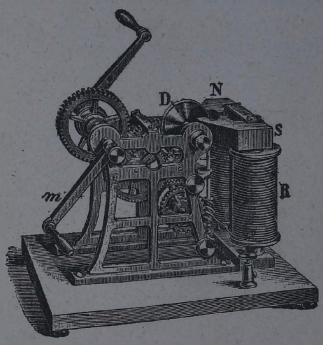


Fig. 365

Le correnti di Foucault sono nocive in molti casi, assorbendo inutilmente una certa quantità di energia, e per questo hanno anche il nome di *correnti parassite*. Si cerca di ridurle al minimo possibile, suddividendo le masse metalliche che son sottoposte a rapide variazioni del flusso di forza, col costruirle di fili o di lamine. Così si fa, ad es., nelle macchine dinamoelettriche, come a suo tempo vedremo, ed anche nel rocchetto di Ruhmkorff.

Rocchetto di Ruhmkorff.

372 — Un' applicazione immediata delle leggi dell' induzione elettromagnetica si ha nel *rocchetto di Ruhmkorff*, col quale riesce possibile, mediante il sussidio della corrente fornita da una pila, o da altro elettrogeneratore a basso potenziale, ottenere scariche elettriche di alto potenziale come colle macchine elettrostatiche.

L' apparecchio si compone di due avvolgimenti di filo, isolati l' uno dall' altro.

Il primo — *induttore* o *primario* — consta di un rocchetto di pochi strati di grosso filo di rame, circondante un nucleo di fili di ferro NN (fig. 366).

Il secondo avvolgimento — *indotto* o *secondario* — è costituito da un altro rocchetto consimile al primario, ma formato da numerosissime spire di filo di rame lungo e sottile, ben isolato, i cui estremi terminano alle palline c, d di uno spinterometro. Nel circuito del primario è intercalata una pila P, e il circuito stesso viene alternativamente aperto e chiuso con grande rapidità mediante un apposito *interruttore*.

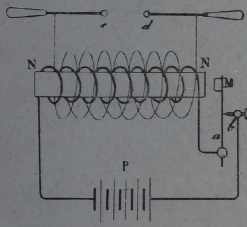


Fig. 366

Per i rocchetti piccoli l' interruttore che si usa è mostrato dalla figura 366, ed è detto *a martello*.

Un' ancoretta M di ferro, portata da una molla a, sta vicina ad una estremità N del nucleo di ferro su cui è avvolto il primario. Alla molla a termina uno dei capi del primario, mentre l' altro è congiunto ad un polo della pila P; il secondo polo di questa comunica infine colla punta b di una vite, contro cui appoggia la molla a.

In tali condizioni il circuito è chiuso, e la corrente della pila circola nel primario. Allora il nucleo N per tal fatto si magnetizza ed attira l' ancora M: con ciò, però, cessa il contatto fra a e b, e quindi subito la corrente s' interrompe. Ma tosto, smagnetizzandosi il nucleo, M cessa di essere attratto, e si ristabilisce il contatto ab. Così la corrente circola di nuovo,

e si ripete ancora indefinitamente, e con grande rapidità, il medesimo giuoco.

Si ha per tal modo una successione rapida di aperture e di chiusure del circuito primario; ciascuna di esse dà luogo nel rocchetto secondario alla corrispondente f. e. m. indotta.

Se l'interruzione è rapida e il numero delle spire del secondario è grande, la variazione del flusso concatenato col secondario è pure rapida e intensa; cosicchè (§ 370) la differenza di potenziale che si produce fra gli estremi *c* e *d* per l'induzione, può essere tanto grande, da far scoccare fra essi una lunga scintilla.

Però la durata dell'interruzione è prolungata da una piccola scintilla, dovuta all'estracorrente del primario, che si forma fra *a* e *b* ad ogni interruzione, e fa sì che la corrente si indebolisca con minore rapidità (§ 369).

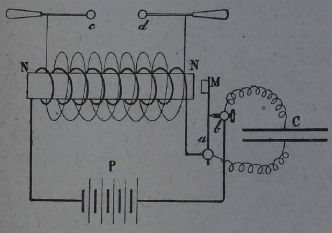


Fig. 367

Si ovvia in gran parte a tale inconveniente aggiungendo un condensatore *C* (fig. 367), le cui armature sono collegate una con la molla *a*, e l'altra con la vite *b* dell'interruttore.

Quando avviene l'interruzione, la massima parte di elettricità invece di passare fra *a* e *b* attraverso il passaggio offerto dalla scintilla, va a caricare il condensatore. Questo poi si scarica attraverso il filo primario, inviandovi una corrente, che neutralizza quasi quella della pila, essendo di senso contrario; e così si evita quasi del tutto la scintilla fra *a* e *b*.

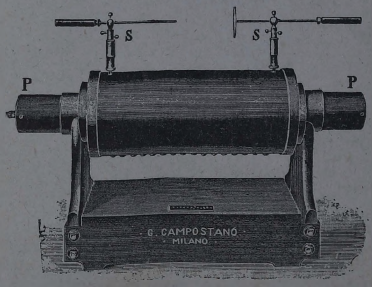


Fig. 368

Con ciò la variazione del flusso di induzione attraverso il secondario sarà più rapida e più intensa; e l'efficacia del rocchetto sarà notevolmente accresciuta.

La figura 368 mostra un grosso rocchetto di Ruhmkorff. Il tubo *PP* racchiude il primario col nucleo; i capi del secondario terminano allo spinterometro *SS*; il condensatore, a carta paraffinata (§ 278), è contenuto entro la base di legno. Per i grossi rocchetti si usano interruttori diversi da quello a martello, i quali non fanno parte integrante del rocchetto.

Telefono.

373 — Un'altra delle più meravigliose applicazioni in cui si profitta delle correnti di induzione è il telefono.

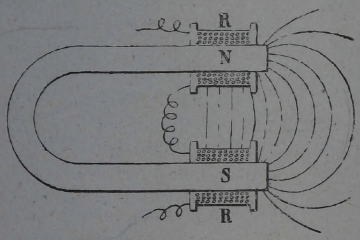


Fig. 369

Il principio sul quale è più specialmente fondato il telefono è il seguente:

Consideriamo un magnete *NS* (fig. 369) a ferro di cavallo, le cui estremità sono circondate da due rocchetti *RR* di filo, avvolti in senso opposto, e facenti parte di uno stesso circuito chiuso. L'andamento delle linee di forza in vicinanza delle spire dei rocchetti è mostrato dalla figura.

Avviciniamo ai poli della calamita un'ancora di ferro dolce *AA* (fig. 370); le linee di forza si modificano in modo da concentrarsi in questa ancora.

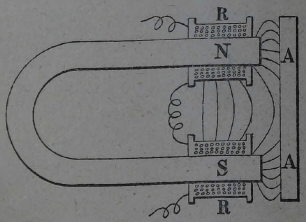


Fig. 370

Il numero delle linee di forza che traversano le spire dei rocchetti è dunque variato; ciò dà luogo, nel circuito dei rocchetti, a correnti indotte di senso concorde.

Allontanando l'armatura, le linee di forza riprendono la loro forma primitiva ed i

rocchetti saranno sede di una corrente indotta di senso contrario a quella di prima.

Inviamo questa corrente nei rocchetti di un apparecchio identico al precedente; a seconda del senso aumenterà o diminuirà la magnetizzazione del magnete, e in conseguenza si modificherà l' attrazione che esso esercita sulla propria ancora.

Dunque, quando la corrente circola in un dato senso, l'ancora sarà più attratta e si avvicinerà ai poli del magnete; quando passa in senso contrario, l' ancora sarà meno attratta e una apposita molla la ricondurrà indietro. L' ancora del secondo apparecchio riprodurrà quindi i movimenti dell' ancora del primo.

Ora, ognuno dei due apparati di cui è costituito il telefono — rappresentato dalla figura 371 — è simile ad uno di quelli ora descritti.

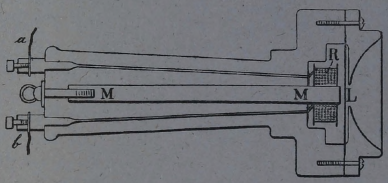


Fig. 371

Se non che il magnete è per lo più un cilindro *MM*, e l' ancora è costituita da una sottile lamina elastica di ferro *L*, mantenuta a piccola distanza da un polo del magnete stesso. Intorno a questo poi è avvolto il rocchetto *R*, il cui filo fa capo ai morsetti *a*, *b*.

Due di tali apparati sono posti coi loro rocchetti in serie.

Quando si parla davanti alla lamina di uno di essi (*trasmettitore*), questa eseguisce una serie di vibrazioni che l' allontanano e l' avvicinano alternativamente al relativo magnete.

La lamina dell' altro magnete (*ricevitore*) effettua delle vibrazioni dello stesso periodo, e di ampiezza proporzionale a quella con cui si compiono le vibrazioni della lamina del primo apparecchio. Quindi il ricevitore riproduce assai fedelmente, in altezza e in relativa intensità, i suoni emessi davanti al trasmettitore.

374 — Microfono. — Un telefono così costituito non trasmette i suoni che a distanze relativamente assai brevi.

Perciò oggi si adoperano altri apparecchi più delicati.

In questi il ricevitore è identico a quello che abbiamo descritto, ma il trasmettitore è totalmente diverso.

Nella sua parte essenziale esso si compone di tre pezzi *A*, *B*, *C*, di carbone di storta, combinati come mostra la figura 372.

I primi due sono fissati ad una tavoletta davanti alla quale si parla; il terzo pezzo *C*, colle estremità appuntite, è incastrato in due fori praticati nei primi due pezzi, in modo però che le punte non forzino, ma lascino un certo gioco.

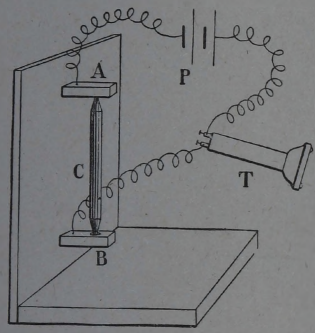


Fig. 372

Un siffatto trasmettitore chiamasi *microfono*; esso si inserisce nel circuito del ricevitore *T* e della pila *P*.

Quando si parla davanti al microfono, le vibrazioni si trasmettono al sistema dei tre carboni; i contatti di *A* e *B* con *C* si modificano, e ne risultano variazioni di resistenza del circuito.

In conseguenza allora varia l' intensità della corrente nel ricevitore telefonico, la cui lastrina eseguisce perciò oscillazioni che riproducono i suoni prodotti davanti al trasmettitore.

Il microfono è un apparecchio molto sensibile, che rende udibili al telefono ricevitore anche suoni e rumori altrimenti impercettibili.

375 — Trasmettitore con microfono e rocchetto d'induzione. — Quando la distanza delle due stazioni telefoniche è grande, le variazioni di resistenza prodotte nel microfono non alterano quasi affatto la resistenza totale del circuito: quindi le variazioni dell' intensità della corrente sono piccole e non agiscono sul ricevitore.

Si rimedia a questo inconveniente inserendo la pila *P* (fig. 373) e il microfono *M* in un circuito molto breve, di cui

fa parte un rocchetto primario *B* con un piccolo numero di spire di grosso filo.

Su questo è avvolto un secondo rocchetto *C*, di un gran numero di spire, che è connesso in circuito col ricevitore *T* mediante i fili di linea.

Essendo il circuito del microfono poco resistente, quando si parla si producono forti variazioni di corrente nel primario

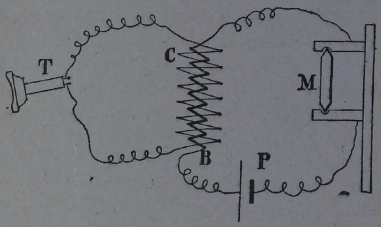


Fig. 373

B: queste allora danno luogo a notevoli f. e. m. indotte nel secondario *C*. Così si hanno nel circuito di questo correnti in un senso o nell' altro, le quali circolando nel telefono ricevitore, imprimono alla membrana le vibrazioni riproducenti il suono.

Macchine magnetoelettriche e dinamoelettriche.

376 — Per alcuni usi, come le sonerie, i telefoni e i telegrafi, conviene servirsi ordinariamente delle pile, come sorgenti di elettricità.

Ma per molte altre ed importantissime applicazioni, come ad esempio l' illuminazione elettrica, i tramways, le ferrovie elettriche, l' uso delle pile si presenterebbe così incomodo e dispendioso, che è praticamente impossibile il servirsi di esse.

Si ricorre allora a speciali apparecchi — le *macchine magnetoelettriche* e *dinamoelettriche* (dette anche semplicemente *dinamo*) — coi quali è possibile la produzione di quantità di energia elettrica veramente enormi, realizzando anche una fortissima economia rispetto alle pile.

Basta dire, a tale proposito, che un kilowatt-ora — ossia l' energia di 1000 watt (§ 361) per un' ora — viene a costare

circa quattro lire se fornito da una pila, mentre oscilla tra i 6 e gli 80 centesimi se proviene da una dinamo.

Oltre a ciò, le dinamo permettono di utilizzare inesauribili sorgenti naturali di energia (le cascate d'acqua), e di trasportare quest'energia a centinaia di chilometri di distanza.

Le dinamo sono fondate sui fenomeni, da noi già studiati, della induzione elettromagnetica (§ 367).

Abbiamo veduto che, ogni volta che accade una variazione nel flusso di forza concatenato con un circuito chiuso, si origina in questo una corrente indotta, il cui senso è diverso, a seconda che si ha un aumento o una diminuzione di flusso.

Abbiamo anche veduto (§ 370) che la f. e. m. indotta è proporzionale direttamente alla variazione del flusso, e inversamente alla durata di tale variazione.

Ora, la variazione del flusso di forza concatenato col circuito stesso, sappiamo potersi ottenere in varî modi: per esempio, anche spostando il circuito in un campo magnetico, in modo che esso abbracci un numero di linee di forza continuamente variabile.

Nelle dinamo appunto la corrente è provocata spostando un circuito chiuso in un campo magnetico: il lavoro meccanico, che così si compie, è in massima parte trasformato in energia elettrica.

377 — **Esperienza del Palmieri.** — Ciò si vede chiaramente nella seguente esperienza dovuta al Palmieri. Abbiasi un circuito chiuso rappresentato schematicamente col rettangolo $ABCD$ (fig. 374), capace di ruotare attorno ad un asse $m\ m$.

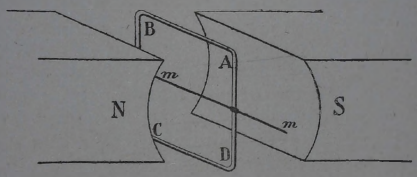


Fig. 374

Poniamo il circuito in un campo magnetico uniforme generato da una calamita NS, o anche semplicemente nel campo magnetico terrestre (§ 327), in modo che l'asse di rotazione sia normale alle linee di forza del campo.

Nella posizione indicata dalla figura, passa, attraverso il piano del circuito, il massimo numero di linee di forza: quindi il flusso concatenato col circuito è il massimo possibile.

Cominciamo a ruotare il circuito attorno all' asse $m\ m$: attraverso ad esso non passeranno più tutte le linee di forza di prima, ma solo una parte di esse: quindi il flusso di forza andrà diminuendo.

Dopo un quarto di giro (a 90°) il piano del circuito diviene parallelo alle linee di forza; allora nessuna di esse lo attraversa, ossia il flusso di forza si annulla.

Continuando a ruotare, il flusso cresce, passa per un massimo (a 180°), poi diminuisce; si annulla di nuovo (a 270°), torna a crescere, e, dopo un giro intero, assume nuovamente il massimo valore.

Quindi durante la rotazione del circuito il flusso di forza concatenato con esso varia continuamente: perciò quel circuito deve essere sede di correnti indotte.

Ora è importante notare che, quando la rotazione avviene con velocità uniforme, non è del pari uniforme la variazione del flusso di forza.

La cosa appare evidente mediante semplici considerazioni geometriche; ma si può dimostrarla anche sperimentalmente,

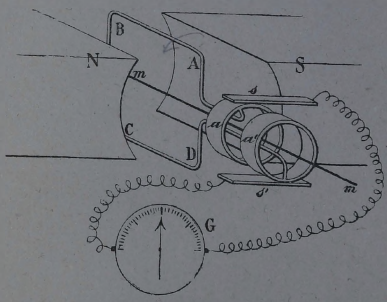


Fig. 375

nel modo che segue. Apriamo il nostro circuito, e saldiamone gli estremi a due anelli di rame a, a' (fig. 375), sui quali sfregano due lamine fisse, di rame s, s' — dette *spazzole* — congiunte metallicamente tra loro attraverso ad un galvanometro G. Facciamo in modo che il circuito sia inizialmente normale alle

linee di forza del campo; se — ruotandolo uniformemente — lo spostiamo di un certo angolo, ad es: di 10°, osserviamo, nel galvanometro, una certa deviazione: essa misura l'intensità, la quale è tanto maggiore quanto più grande è la quantità di elettricità che per l' induzione ha percorso il circuito. Spostandolo — colla medesima velocità costante di prima — di altri 10°, osserveremo una deviazione maggiore; spostandolo ancora di 10°, osserveremo una deviazione ancora maggiore: in poche parole, osserveremo che la quantità di elettricità indotta, per lo spostamento del circuito di 10°, va continuamente crescendo, quando dalla posizione iniziale *1* (fig. 376) si va verso la posizione *2* facente con quella un angolo di 90°.

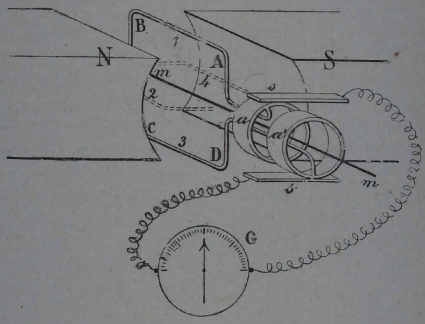


Fig. 376

A partire da questa posizione la quantità di elettricità indotta diminuisce fino alla posizione *3* (a 180°), poi cresce nuovamente fino alla posizione *4*, e di là decresce quando il circuito torna alla posizione iniziale.

Quindi anche la variazione di flusso — che è proporzionale alla quantità di elettricità indotta (§ 370) — cambia, durante un giro, nel modo suddetto.

La f. e. m. indotta, che sappiamo essere proporzionale alla variazione del flusso, non è dunque costante: inoltre, come potremo osservare anche col galvanometro, essa ha un certo senso mentre il circuito va da *1* a *3*, si annulla in *3*, è di senso opposto da *3* fino in *1*, si annulla di nuovo in *1*, e così via.

Vediamo come mai ciò accade. Mentre il nostro circuito va da *1* in *2*, il flusso di forza concatenato con esso va continuamente

decrescendo, fino ad annullarsi in *2*: da *2* a *3* va invece crescendo: dunque, nella posizione *2* la f. e. m. indotta dovrebbe cambiar senso (§ 367). Ma nello stesso istante il circuito si rovescia, e perciò le linee di forza, che entravano prima dalla faccia superiore, cominciano ora ad entrare dalla faccia inferiore, il che porterebbe pure un cambiamento di senso: e quindi la f. e. m. ha ancora, fino in *3*, un senso costante.

Giunti invece nella posizione *3*, il flusso concatenato col circuito, che era aumentato da *2* fino a *3*, comincia a diminuire, poichè passa, attraverso il circuito, un numero di linee di forza sempre minore; d'altra parte le linee di forza entrano ed escono sempre dalla medesima faccia del piano del circuito: quindi ora la f. e. m. indotta cambia di senso.

Tornato infine il circuito nella posizione iniziale, la f. e. m. indotta riprende il senso primitivo.

Concludendo: mentre il nostro circuito ruota nel campo magnetico, esso diviene sede di una corrente, la cui f. e. m. varia continuamente, al variar dell'angolo che esso fa con la sua posizione iniziale. E se riportiamo, in un sistema di assi coordinati, come ascisse l'angolo di cui ha ruotato (o il tempo che ha impiegato, essendo la rotazione uniforme) e come ordinate il corrispondente valore della f. e. m. indotta, otteniamo una curva della forma indicata nella figura 377.

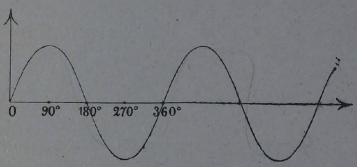


Fig. 377

La curva è identica a quella che esprime come varia il *seno* di un angolo, al variare dell'angolo.

Quindi *la f. e. m. indotta in un circuito che ruota uniformemente in un campo magnetico uniforme, è, in ogni istante, proporzionale al seno dell'angolo di rotazione.*

Dunque, un apparecchio come quello ora descritto genera un corrente di cui la intensità cambia continuamente di valore e periodicamente di senso, cioè, come si suol dire, una *corrente alternata*.

Un fenomeno identico si ha anche quando il circuito gira nel campo magnetico nel modo indicato dalla figura 378.

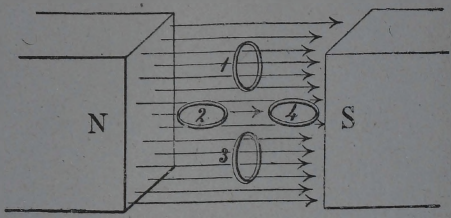


Fig. 378

Anche in tal caso si ha una corrente indotta, di cui la f. e. m. cresce a partire da *1*, raggiunge un massimo in *2*, si annulla e cambia senso in *3*, etc.

378 — **Dinamo.** — Le dinamo attualmente in uso non sono che un perfezionamento dei semplici apparecchi or ora descritti.

In luogo di un semplice rettangolo come quello della fig. 376, abbiamo nelle dinamo un gran numero di spire (che costituiscono il *circuito indotto)*, perchè la produzione della corrente indotta riesca più abbondante. Queste spire sono avvolte sopra un blocco di ferro dolce foggiato *a tamburo*, o *ad anello*, secondo che l' indotto ruota nel campo magnetico nel modo indicato dalla figura 376, o in quello indicato dalla figura 378. Tale tamburo od anello di ferro dolce ha lo scopo di addensare nell' interno del circuito un più gran numero di linee

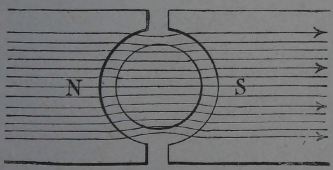


Fig. 379

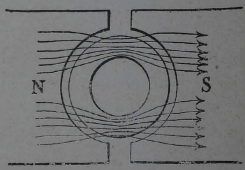


Fig. 380

di forza (fig. 379 e 380), in modo da rendere maggiore la variazione del flusso, e quindi la f. e. m. indotta (§ 370).

Il campo magnetico non è generato — nelle dinamo — da una calamita permanente, ma da una potente elettrocalamita,

l' avvolgimento della quale dicesi *circuito inducente*. Essa è eccitata — come vedremo in seguito — dalla corrente stessa che vien fornita dalla dinamo.

Infine, un dispositivo speciale, detto *collettore*, permette di raccogliere la corrente alternata ottenuta dalla rotazione dell' indotto, e di trasformarla insieme in corrente continua.

379 — Anello di Pacinotti. — La prima macchina di questo tipo è stata realizzata mediante l' *anello di Pacinotti*.

Esso è formato da un anello di ferro dolce *AA* (fig. 381) capace di girare attorno ad un asse passante pel suo centro *O*, tra le espansioni polari *N*, *S* di una potente calamita, od elettrocalamita, a ferro di cavallo.

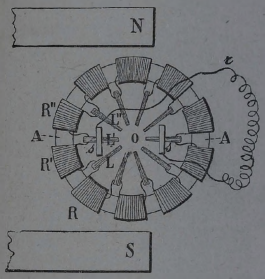


Fig. 381

Sull' anello sono avvolti tanti rocchetti di filo isolato *R*, *R'*, *R''*.., che costituiscono il circuito indotto. Essi sono tutti riuniti in serie, ed i loro punti di attacco son congiunti ad altrettante lastrine di rame *L*, *L'*, *L''*... isolate le une dalle altre. Queste son poi piegate ad angolo retto come mostra la figura 382, in modo da ricoprire per un certo tratto l' asse di rotazione dell' anello. Esse costituiscono il collettore.

Agli estremi del diametro perpendicolare alla linea *NS*, si hanno due pezzi di metallo o di carbone, *s*, *s*, detti *spazzole*, ognuno dei quali appoggia contro una lastrina del collettore.

Quando l' indotto ruota, le spazzole, che rimangono immobili, sfregano su di esso, e vengono a contatto successivamente con tutte le coppie di lastrine diametralmente opposte.

Dalle spazzole infine partono i capi del circuito *r* (fig. 381) in cui si utilizza la corrente, comprendente, ad es., lampade, motori, accumulatori, ecc.

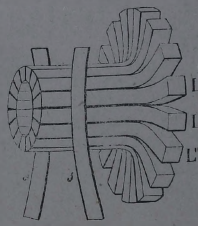


Fig. 382

I capi di questo *circuito di utilizzazione*, essendo fissi alle spazzole *s*, *s*, sono perciò sempre in comunicazione con rocchetti di filo che occupano, l' uno

dopo l'altro, la medesima posizione rispetto all' elettromagnete. Quindi la corrente non può invertirsi: la sua intensità non fa che oscillare leggermente attorno ad un certo valore.

Riportando anche qui in un sistema di assi, come ordinate la f. e. m. indotta, e come ascisse l' angolo di rotazione, otteniamo una linea che è molto prossima ad una retta parallela all' asse delle ascisse (f. e. m. costante): e tanto più prossima, quanto maggiore è il numero delle lastrine del collettore.

L' anello di Pacinotti si presta dunque benissimo per fornire una corrente continua, trasformando, con ottimo rendimento (circa l' 80 %), il lavoro meccanico fornito da un qualunque motore (a gas, a vapore, idraulico, ecc.) in energia elettrica.

380 — Produzione del campo magnetico nelle dinamo. — Come abbiam detto, per ottenere dalla dinamo una corrente elettrica, bisogna adunque far ruotare il circuito indotto in un campo magnetico.

Questo campo può essere generato o da un magnete permanente o da un elettromagnete.

Nel primo caso l' apparecchio prende il nome di *macchina magnetoelettrica*, nel secondo di *macchina dinamoelettrica*.

Le macchine magnetoelettriche sono poco usate nell' industria, perchè danno delle correnti molto deboli. Si usano quasi sempre le seconde.

In queste l' elettromagnete può venire eccitato da una sorgente ausiliaria di elettricità, come ad es. da una batteria di pile (*eccitazione indipendente*): ma il metodo è, come bene s' intende, molto scomodo, ed anche poco economico, sicchè l' industria elettrica fece un gran passo, quando, in seguito agli studi di Siemens e di Wheatstone, potè emanciparsi dalla corrente ausiliaria, ricorrendo ad un altro metodo di eccitazione: all' *autoeccitazione*.

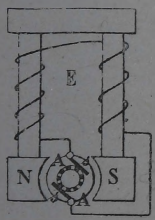


Fig. 383

Rammentiamo (§ 316) che se un pezzo di ferro viene magnetizzato, conserva poi sempre un po' di magnetismo residuo.

Immaginiamo ora che un indotto *AA* (fig. 383) — ad es. ad anello — giri tra le espansioni polari *N S* di un elettromagnete *E*; e supponiamo che le spazzole *s*, *s*

mettano in comunicazione diretta il circuito indotto con l'avvolgimento dell'elettromagnete.

Quando l'anello *AA* gira, si produce, in virtù del debole magnetismo residuo, una certa f. e. m. indotta; quindi una corrente circola per l'avvolgimento del magnete, ed aumenta l'intensità del campo magnetico. In conseguenza aumenta allora la f. e. m. indotta, e quindi anche la corrente; e così via, finchè — raggiungendo il ferro la sua massima magnetizzazione — la forza elettromotrice non raggiunge un certo valore, che poi resta costante.

Ponendo il circuito di utilizzazione in serie (fig. 384), oppure in derivazione (fig. 385) sull'avvolgimento dell'elettromagnete, si hanno i due modi più comuni di eccitazione, che sono detti appunto *eccitazione in serie* ed *eccitazione in derivazione*.

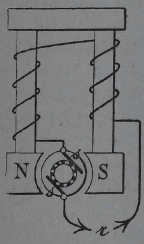


Fig. 384

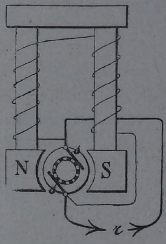


Fig. 385

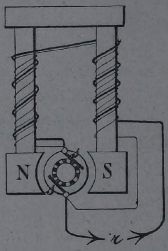


Fig. 386

Colla prima disposizione si fa circolare nell'elettromagnete tutta la corrente fornita dalla dinamo; l'avvolgimento dell'elettromagnete allora è formato di filo grosso e corto, in modo che solo una piccola porzione dell'energia fornita sia assorbita dal magnete, e la maggior parte di essa rimanga disponibile.

Colla seconda disposizione, invece, solo una piccola parte della corrente prodotta viene mandata nell'avvolgimento del magnete. Esso è quindi formato di filo lungo e sottile, in modo da presentare una grande resistenza.

Ognuna di queste due disposizioni ha vantaggi suoi proprî: si cerca quindi talvolta di riunire i vantaggi dell'una con quelli dell'altra, usando una *eccitazione composta* come mostra la figura 386.

381 — Le correnti di Foucault nelle dinamo. — Quando l'anello di una dinamo gira rapidamente nel campo magnetico, è chiaro che si produrranno, nell'interno della massa metallica, delle correnti di Foucault (§ 371).

Queste correnti, che circolano nella massa di ferro, assorbono, in pura perdita, una grande quantità di energia; inoltre riscaldano fortemente l'indotto compromettendone l'isolamento.

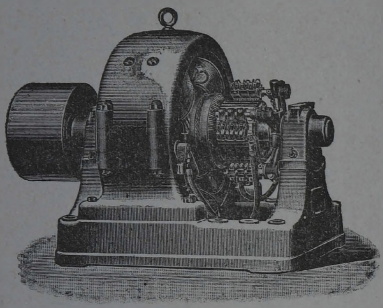


Fig. 387

Si eliminano, o meglio — come si disse (§ 371) — si attenuano, questi gravi inconvenienti, sfogliando l'anello, vale a dire costruendolo, anzichè con un blocco di ferro massiccio, con tante lamine sottili, isolate le une dalle altre, e disposte tutte parallelamente alle linee di forza del campo.

In questo modo ogni lamina, disposta nel senso del campo magnetico, è attraversata, durante la rotazione, soltanto da un piccolo numero di linee di forza, e diviene quindi sede di una f. e. m. debolissima. Inoltre la notevole resistenza elettrica opposta dalle lamine, indebolisce ancora la intensità delle correnti parassite.

Con tale espediente si costruiscono ora delle dinamo di un ottimo rendimento. La figura 387 ne presenta un tipo dei più adoperati.

382 — Alternatori. — Oltre le correnti continue, occorrono spesso nella pratica correnti alternate.

Per produrre una corrente alternata, si potrebbe ricorrere ad apparecchi semplici come quello che ci ha servito a ripetere la esperienza del Palmieri (§ 377), eccitando però il campo magnetico con una sorgente ausiliaria di corrente continua. Tuttavia per ottenere in tal modo correnti alternate di periodo non troppo lento, occorrerebbero velocità troppo grandi.

Si preferisce quindi, per ottenere delle correnti alternate, ricorrere a speciali apparecchi, detti *alternatori*.

Uno dei più comuni è l'alternatore Siemens. Esso è costituito da una duplice corona di elettromagneti E, E', E'', ecc. (fig. 388), eccitati da una piccola dinamo a corrente continua collocata sull' asse stesso dell' alternatore, e disposti in modo da produrre campi magnetici alternativamente di senso contrario, come mostra la figura.

Tra queste due corone si fa ruotare a grande velocità un indotto, costituito da tanti rocchetti piatti di filo A, B, C...., quante sono le coppie di elettromagneti, avvolti alternativamente in un senso e nell' altro, come indica la figura stessa. Le due estremità del *circuito indotto* così formato sono saldate a due anelli isolati di rame, su cui sfregano al solito le spazzole.

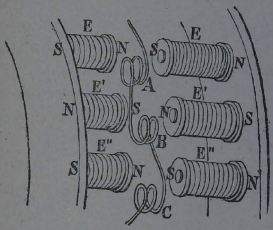


Fig. 388

Se osserviamo che cosa accade, durante la rotazione, in uno dei rocchetti, vediamo che esso è attraversato successivamente da flussi di forza di senso contrario: quindi esso divien sede di una f. e m. alternata.

Ora, tutti i rocchetti entrano ed escono contemporaneamente dai varî campi magnetici di E, E', E''....; e poichè sia le direzioni dei campi, sia gli avvolgimenti dei rocchetti, sono alternativamente di senso contrario, tutti i rocchetti divengono sede di f. e. m. uguali in ogni istante, sia in valore che in segno. Essendo allora i rocchetti disposti in serie, le varie f. e. m. indotte si sommano tutte fra loro, dando luogo ad una f. e. m. totale tante volte più intensa.

Quindi, qualunque circuito che si chiuda sulle spazzole, verrà percorso da una corrente alternata.

Motori elettrici.

383 — Motori a corrente continua. — La proprietà più meravigliosa delle dinamo è la loro perfetta reversibilità. Vale a dire che, mentre facendo ruotare l' indotto di una dinamo, con spesa di lavoro meccanico, otteniamo una corrente, viceversa, se lanciamo nel circuito indotto una corrente, l' indotto stesso si pone a ruotare, fornendo lavoro meccanico; ossia, una dinamo può essere anche adoperata come *motore elettrico* (fig. 389).

Per vedere come ciò accade, torniamo a considerare l'anello di Pacinotti, e manteniamone le spazzole ad una certa differenza di potenziale, ponendole, ad es., in comunicazione con i poli di una batteria *P* di pile (fig. 390).

La corrente della batteria, entrando allora per le spazzole *s s* nell' indotto, si divide in due rami e magnetizza l'anello, in modo da formare due magneti curvi, con due poli, ad es. nord, affacciati in *a*, e due poli sud affacciati in *b*.

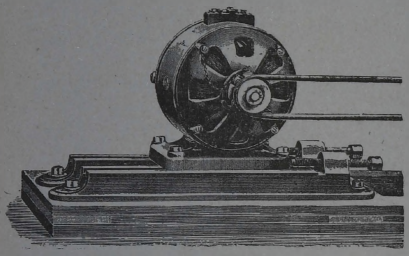


Fig. 389

Allora il magnete *NS* attrae il magnete ad anello che si è formato, e questo è quindi sollecitato a ruotare nel senso della freccia; ruotando, le spazzole abbandoneranno le lamine del collettore, con le quali erano in contatto, e si porranno in contatto con le due successive: in modo che nell'anello persisterà sempre la polarità nei due punti *a*, *b*, e la rotazione continuerà indefinitamente.

Anche in un motore, come in una dinamo, il campo magnetico può esser prodotto sia da un magnete permanente, sia da un elettromagnete: naturalmente, si ricorrerà sempre a quest' ultimo, quando si richieda un grande sviluppo di energia.

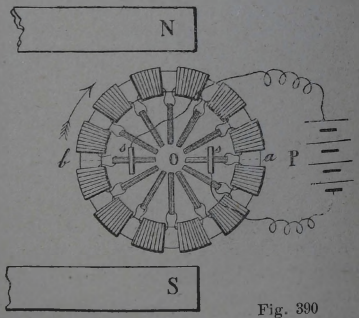


Fig. 390

Esso è in ogni caso eccitato dalla sorgente stessa di elettricità che fornisce la corrente per l' indotto; e anche nei motori si può mettere l' avvolgimento dell' elettromagnete o in serie o in derivazione sull' indotto. Vale a dire che si può far circolare nell' elettromagnete, o tutta la corrente che alimenta l' indotto (e allora

l'avvolgimento deve avere poca resistenza, perchè assorba poca energia); ovvero solo una parte di essa (e allora l'avvolgimento deve avere molta resistenza, perchè solo una piccola parte della corrente fornita dalla sorgente circoli in esso).

384 — Forza controelettromotrice di un motore elettrico. — Comunque sia disposto l'inducente di un motore elettrico, si hanno, durante il suo movimento, delle particolarità che è opportuno studiare.

Per questo, nel circuito di una batteria di pile inseriamo un motore e un amperometro.

Appena chiuso il circuito, l'amperometro segna una certa intensità di corrente I; ma a mano a mano che il motore si avvia e ruota con velocità sempre maggiore, noi vedremo che l'intensità della corrente va diminuendo fino ad un certo valore i. Se improvvisamente arrestiamo il motore frenandolo, la corrente torna ad assumere il valore primitivo I.

Il fenomeno non può sorprenderci, se si tien conto che alla energia elettrica, come ad ogni altra, è applicabile il principio della conservazione dell'energia. Infatti, se lanciamo la corrente tenendo fermo il motore, tutta l'energia elettrica viene trasformata in calore, e la corrente assume il valore I che le compete senz'altro per la legge di Ohm: ma, se il motore si pone in movimento, il lavoro meccanico che viene prodotto non può essere ottenuto se non a spese di una parte dell'energia elettrica fornita dalla sorgente: l'intensità della corrente deve quindi diminuire.

In effetto, quando l'indotto di un motore ruota in un campo, sviluppa, come una dinamo, una certa f. e. m., la quale, essendo opposta a quella della sorgente, viene detta *forza controelettromotrice*, o, brevemente, *f. c. e. m.*

Quando il motore è fermo, la f. c. e. m. è nulla; quindi la intensità I della corrente sarà:

$$I = \frac{E}{R},$$

se E è la f. e. m. della sorgente, ed R la resistenza totale del circuito (§ 352). Ma, posto il motore in rotazione, esso svilupperà una certa f. c. e. m.; e questa è tanto maggiore, quanto maggiore è la velocità.

Se ad un certo istante, la f. c. e. m. ha il valore e, nel circuito circolerà una corrente di intensità i, data da:

$$i = \frac{E - e}{R}. \qquad (17)$$

E sarà quindo i tanto minore di I, quanto maggiore è la velocità del motore.

385 — **Motori a corrente alternata.** — Questi motori servono, come quelli a corrente continua, a trasformare in lavoro meccanico la energia elettrica posseduta da una corrente: ma questi utilizzano la corrente *alternata*.

Se ne costruiscono di due specie, secondo due diversi principî: e sono detti *motori sincroni* e *motori asincroni*.

I primi sono di costruzione e di funzionamento assai delicati, e presentano anche inconvenienti notevoli. Lo studio di essi è alquanto complicato, e noi non lo intraprenderemo; daremo invere un cenno dei motori asincroni, e del principio sul quale la maggior parte di essi sono fondati: il *campo magnetico rotante*.

386 — **Campo rotante.** — Abbiamo veduto (Vol. I, § 248) in qual modo si può costruire sperimentalmente la traiettoria del movimento risultante di due movimenti pendolari, ed abbiamo pure veduto varie forme di essa. Ripetendo l' esperienza con due pendoli oscillanti col medesimo periodo, colla medesima ampiezza, però spostati di fase di $^1/_4$ di periodo, e disposti in modo che i loro piani di oscillazione facciano tra loro un angolo retto, troveremo che *la traiettoria risultante è un cerchio*.

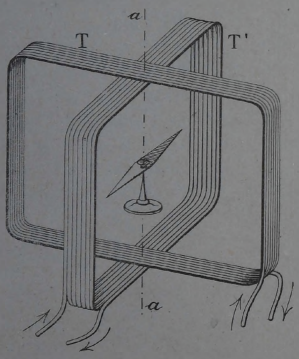


Fig. 391

Dunque: *il moto risultante di due movimenti pendolari facenti tra loro un angolo di 90 gradi è un movimento circolare*.

Con analoghe esperienze potremo dimostrare che il risultante di tre moti pendolari facenti fra loro un angolo di 120° è pure un cerchio; e così via.

Prendiamo adesso un telaio rettangolare T (fig. 391), su cui sia avvolto del filo isolato: inviandovi una corrente continua esso crea un campo magnetico, la cui intensità è costante,

normale al piano del circuito, e diretta da una determinata parte conformemente alla regola della mano destra (§ 334).

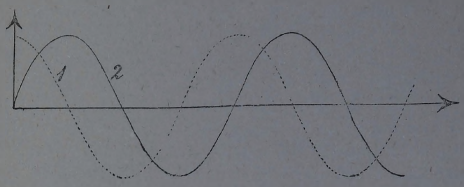


Fig. 392

Se vi mandiamo invece una corrente alternata, la intensità I del campo andrà continuamente variando di grandezza, e sarà diretta alternativamente da una parte e dall' altra del telaio ad ogni cambiamento di senso della corrente.

Prepariamo inoltre un secondo telaio T', identico al primo, e ruotiamolo di 90° attorno all' asse $a\ a$, per modo da disporlo perpendicolare a quello (fig. 391).

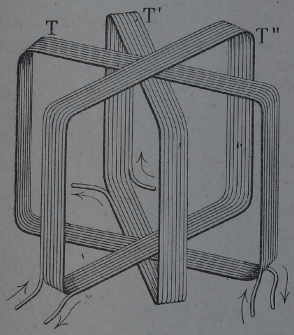


Fig. 393

Lanciamo in esso pure una corrente alternata, della medesima frequenza e della medesima ampiezza della prima ma spostata di fase di 90° rispetto ad essa: vale a dire tale che la sua intensità (fig. 392, curva *2*) sia nulla, quando quella della prima (curva *1*) è massima, ecc. Queste due correnti possono esser prodotte da un medesimo speciale alternatore, detto *alternatore bifase*. Anche la seconda produrrà un campo magnetico, la cui intensità I' varierà nello stesso modo dell' intensità I, avrà la medesima frequenza, la medesima ampiezza, ma sarà spostata di fase di 90° rispetto a quella.

Per studiare il campo generato dalle due correnti che agiscono simultaneamente, basterà per ogni istante comporre, colla

regola del parallelogrammo, le due intensità I ed I', nello stesso modo col quale si compongono due forze (Vol. I, § 64). Se si calcola ad ogni istante la grandezza e la direzione della intensità del campo risultante, si trova che esso rimane sempre di grandezza costante, e ruota uniformemente. E ciò è conforme a quanto mostra l' esperienza dei due pendoli sopra accennata.

Il medesimo risultato si otterrebbe, se lanciassimo in tre telai T, T', T'' (fig. 393), facenti tra loro un angolo di 120°, tre correnti alternate di uguale ampiezza e frequenza, spostate di fase di 120° l' una rispetto all' altra. Anche tre correnti siffatte possono essere prodotte da uno stesso alternatore, detto in tal caso *alternatore trifase*.

Così, sospendendo nell' interno dei telai un ago magnetico, libero di ruotare attorno all' asse aa (fig. 391), e lanciando nei circuiti correnti alternate spostate di fase come abbiamo detto, l' ago magnetico si pone a ruotare.

Su questo principio sono fondati i *motori a campo rotante* attualmente in uso: essi son detti *motori bifasi* o *trifasi*, a seconda che le correnti alternate che generano il campo rotante sono due o tre. La bontà di questi motori deriva in gran parte della loro estrema semplicità: basti dire, infatti, che in alcuni tipi la parte mobile è costituita da un sol blocco di metallo: le correnti indotte che in esso si generano fanno sì che questa parte mobile si comporti come una calamita, e ruoti, trascinata dal campo magnetico.

La invenzione dei motori a campo rotante — dovuta a Galileo Ferraris — ha reso possibile un larghissimo uso industriale delle correnti alternate, non solo per l' illuminazione, ma anche per la forza motrice: ed ha perciò facilitato moltissimo — come ora vedremo — la soluzione del problema del trasporto dell' energia elettrica a grandi distanze.

Trasporto dell' energia.

387 — Così l' energia sviluppata da una cascata di acqua si può trasportare a centinaia e centinaia di chilometri di distanza. L' acqua che cade aziona delle potenti dinamo, e la corrente che esse forniscono è lanciata in alcuni fili conduttori, coi quali la si conduce dovunque torni comodo utilizzarla. Ad es., la enorme energia sviluppata dalle cascate di Tivoli, che non potrebbe esser comodamente usata sul posto,

vien portata a Roma, dove trova un larghissimo uso nel trams, nelle industrie, nell'illuminazione, ecc.

Così, in ogni grande stabilimento industriale, in luogo di un complicato e fragoroso insieme di trasmissioni e di puleggie, che dalla motrice centrale si diramino in tutte le direzioni, assorbendo una grande quantità di energia, bastano alcuni semplici fili di rame, per portare l'energia e la luce in ogni angolo dello stabilimento.

388 — Scelta della corrente. — Per moltissimi scopi industriali — come, ad es., per l' illuminazione e la trazione elettrica — la corrente continua e quella alternata possono essere utilizzate pressapoco ugualmente bene. Però, per il trasporto a grandi distanze, è molto più conveniente usare questa che non quella. E di ciò tosto ci convinceremo.

Supponiamo, intanto, di dover trasportare una certa quantità W di energia ad un centinaio di chilometri di distanza; occorrerà impiantare una dinamo, o meglio varie dinamo, che forniscano una certà f. e. m. E ed una intensità di corrente I, tali che si abbia (§ 361):

$$W = E \, . \, I.$$

Si può ottenere, quindi, una grande potenza o con una elevata f. e. m. ed una intensità di corrente moderata, o viceversa con una grande intensità e una moderata f. e. m.

Il secondo di questi metodi è poco economico; poichè, se l'intensità della corrente è grande, sarà pure grande la energia dissipata lungo la linea sotto forma di calore, secondo la legge di Joule (§ 356); e — a meno di non costruire la linea con cavi di rame molto grossi, il che fa crescere esageratamente la spesa d'impianto — solo una piccola parte dell'energia sviluppata rimarrà disponibile a destinazione.

Conviene quindi attenersi al primo metodo, mandando nella linea una corrente poco intensa, ma ad alto potenziale.

389 — Trasformatori. — Giunta però la corrente a destinazione, sarebbe malagevole, e anche pericoloso, l'usarla a quell'elevato potenziale.

S'impone quindi l'uso di un *trasformatore,* che abbassi il potenziale della corrente, aumentandone corrispondentemente l'intensità; in modo che, se E ed E', I ed I' sono le f. e. m.

e le intensità della corrente prima e dopo il passaggio attraverso il trasformatore, si avrà — a meno di lievi perdite — la relazione:

$$EI = E'I'. \tag{18}$$

Ora, si comprende che per la corrente alternata può servire un apparecchio come il rocchetto di Ruhmkorff (§ 372) sprovvisto dell'interruttore: giacchè lanciando nel secondario la corrente ad alta tensione, il primario diviene sede di una corrente molto intensa, ad un potenziale assai più basso.

Per la corrente continua, invece, un simile modo di trasformazione è impossibile; per abbassarne il potenziale occorre lanciarla in un motore che azioni una dinamo a basso potenziale. Questo metodo è evidentemente molto più incomodo e, ciò che maggiormente importa, più costoso — nell'impianto e nella manutenzione — di un semplice rocchetto d'induzione.

Per questa ragione il problema del trasporto della energia a grandi distanze non è stato praticamente risolto, se non quando si sono costruiti gli alternatori, e i motori a corrente alternata.

Onde elettromagnetiche.

Scariche oscillatorie.

390 — Scarica di un condensatore. — Abbiamo veduto al § 369 che la corrente di una pila non acquista istantaneamente, alla chiusura del circuito, l'intensità che sarebbe determinata dalla legge di Ohm, ma raggiunge a poco a poco questo valore in un tempo apprezzabile, dopo di che la corrente ha il suo regime costante.

Quando invece congiungiamo con un conduttore M (fig. 394) le due armature di un condensatore carico C, il passaggio dell'elettricità da un'armatura all'altra, ossia *la scarica del condensatore*, avviene in modo diverso, poichè le due armature non rimangono a potenziale fisso.

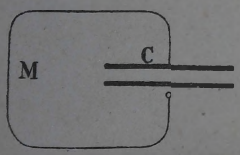


Fig. 394

È interessante studiare in qual modo procede la scarica, a seconda della resistenza e dell'autoinduzione del circuito M.

Il problema è stato trattato teoricamente e sperimentalmente, ma noi non seguiremo nè le considerazioni teoriche, nè le ricerche sperimentali: cercheremo invece di renderci conto dei fatti giovandoci di alcune analogie meccaniche.

391 — **Analogie meccaniche.** — Si abbia, ad esempio, un pendolo *A B* (fig. 395), mobile *in un mezzo che presenti un forte attrito:* se allontaniamo il pendolo dalla sua posizione di riposo e lo abbandoniamo a sè stesso, comincia il suo movimento, dapprima accelerato, ma senza raggiungere mai

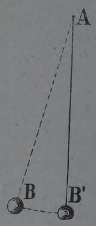


Fig. 395

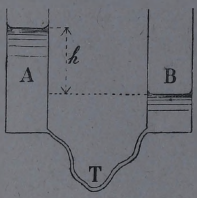


Fig. 396

una grande velocità per l' attrito del mezzo. Col procedere del suo moto, diminuisce la forza che tende a portarlo nella posizione di riposo *B'*, e diminuisce quindi anche la sua velocità,

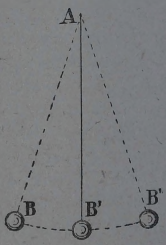


Fig. 397

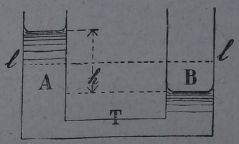


Fig. 398

fino a che lentamente raggiunge la posizione di riposo, nella quale si arresta.

Così pure, mettendo in comunicazione tra loro due vasi *A*, *B* contenenti acqua a due diversi livelli (fig. 396) *per mezzo del*

tubo lungo e stretto T, la corrente d'acqua che si stabilisce attraverso a *T* è tanto più veloce quanto maggiore è il dislivello *h* fra le superficie libere nei due vasi; passando l'acqua da *A* in *B*, il dislivello *h* diminuisce, e diminuisce la corrente in *T*, sino a che si annulla quando l'acqua è arrivata nei vasi allo stesso livello.

Se per altra parte lasciamo che il pendolo si muova liberamente, cioè *in un mezzo con pochissimo attrito*, non si opporrà alla rapidità del suo moto che l'inerzia della sfera. Quando questa scende da *B* in *B'* (fig. 397), pur indebolendosi la forza che la sollecita verso la posizione di riposo, il suo movimento si accelera, e, come ben sappiamo, raggiunge il suo massimo di velocità in *B'*: continua quindi per inerzia fino in *B''*, e si arresta soltanto dopo una serie di oscillazioni (Vol. I, § 120).

In modo analogo, se noi riuniamo i due vasi *A* e *B* (fig. 398) *con un tubo largo e breve*, ciò che determina la velocità dell'efflusso è sopratutto l'inerzia dell'acqua contenuta nei vasi e nel tubo: la velocità con cui l'acqua si muove va continuamente crescendo man mano che le superficie libere in *A* e in *B* si accostano allo stesso livello *l*; ma quando questo è raggiunto, tutta la massa d'acqua è in moto, con una velocità notevole, e quindi seguita a muoversi nel medesimo senso; dimodochè il dislivello cresce in senso contrario a quello prima esistente. Così l'acqua, prima di fermarsi al livello *l*, compie una serie di oscillazioni.

392 — Scarica in un circuito di grande resistenza e di autoinduzione piccolissima. — Un comportamento analogo a quello del moto del pendolo e dell'efflusso del liquido fra i due vasi, noi riscontriamo nella scarica dei condensatori.

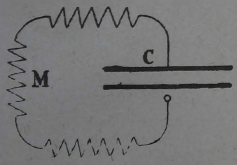


Fig. 399

Supponiamo anzitutto che il circuito *M* (fig. 399) in cui si fa avvenire la scarica, abbia una *grande resistenza* e una *piccolissima autoinduzione*. Quando con esso si riuniscono le armature del condensatore *C*, per la differenza di potenziale esistente fra queste si stabilisce subito, attraverso ad *M*, una corrente elettrica, la quale — per avere il circuito una autoinduzione trascurabile — raggiunge rapidissimamente il

valore dato dalla legge di Ohm. Però, man mano che la corrente attraversa *M*, il condensatore si scarica, la differenza di potenziale fra le armature diminuisce, e diminuisce quindi anche l' intensità della corrente.

In breve tempo si annulla la differenza di potenziale fra le armature, e cessa allora la corrente.

Nella figura 400 sono disegnate le curve della differenza di potenziale e dell' intensità di corrente nel caso sopra riferito. Sulle ascisse son riportati i tempi, sulle ordinate i valori delle differenze di potenziale per la curva *1*, e delle intensità della corrente per la *2*. Le due curve *1* e *2* si accostano insieme all' asse delle ascisse; ossia, *differenza di potenziale e intensità tendono ad annullarsi contemporaneamente.*

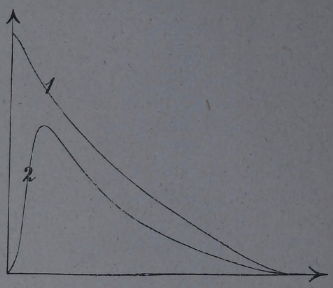


Fig. 400

393 — Scarica in un circuito di grande autoinduzione e di resistenza piccolissima. — Il caso è molto diverso se il circuito *M* (fig. 401) ha invece una *notevole autoinduzione* e una *resistenza trascurabile.*

In questa condizione ciò che contrasta allo stabilirsi della corrente nel circuito è soltanto l' *inerzia elettrica* di questo. E troviamo che, mentre procede la scarica del condensatore, pur diminuendo la differenza di potenziale agli estremi di *M*, la corrente va continuamente crescendo, allo stesso modo come va continuamente crescendo la velocità di discesa di un pendolo abbandonato all' oscillazione in un mezzo senza attrito. Di guisa che, dopo un certo tempo (molto breve di solito) dacchè le due armature sono state messe in comunicazione, si raggiungono le condizioni seguenti: differenza di potenziale tra le armature *nulla*, intensità della corrente di scarica nel circuito *massima*.

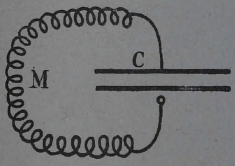


Fig. 401

Ora, noi sappiamo bene (§ 369) che la corrente, in un circuito in cui sia stata soppressa la f. e. m. agente, non cessa all' istante, ma prosegue invece nello stesso senso per un certo tempo e con intensità decrescente: così accade ora, e il circuito mantenendo per un certo tempo la corrente nel senso di prima, carica il condensatore, portando elettricità positiva su quella armatura che prima era negativa, e viceversa.

Ma raggiunto un certo valore della differenza di potenziale, la scarica riprende in senso contrario, con lo stesso comportamento ora descritto.

Dunque per un certo tempo il circuito sarà percorso da correnti che cambiano continuamente di senso, e che, come il calcolo dimostra, hanno f.e.m. e intensità variabili con la stessa legge con cui variano lo spostamento e la velocità di un pendolo che oscilla.

In altre parole, se in un sistema di assi coordinati, portiamo sull' asse delle ascisse i tempi, e sull' asse delle ordinate i valori delle differenze di potenziale e delle intensità, avremo rispettivamente le curve *1* e *2* della figura 392 a pagina 335.

Da esse si vede che, quando la differenza di potenziale agli estremi del filo ha un massimo, l' intensità della corrente ha il valor zero, e viceversa. Ossia, f.e.m. e intensità di corrente oscillano tutte e due con legge pendolare, essendo però le loro oscillazioni spostate di un quarto di periodo.

394 — **Risultati teorici.** — Questi che abbiamo citati sono due casi estremi: nella pratica avremo circuiti di cui non sarà trascurabile nè la resistenza, nè l' autoinduzione.

Un calcolo, che qui non possiamo riferire, ha mostrato che la scarica di un condensatore è *oscillatoria* quando tra la resistenza R e l' autoinduzione L del circuito, e la capacità C del condensatore esiste la relazione

$$R < \sqrt{\frac{4\,L}{C}}\,; \qquad (19)$$

e invece non è oscillatoria se

$$R > \sqrt{\frac{4\,L}{C}}\,. \qquad (20)$$

Nel 1° caso poi, supponendo che la resistenza sia trascurabile, il periodo T di oscillazione è legato all' autoinduzione

L del circuito e alla capacità C del condensatore dalla relazione:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \tag{21}$$

In pratica però è impossibile realizzare un circuito senza resistenza, e quindi il passaggio della corrente nel filo dissiperà sempre in calore una certa quantità di energia.

Allora, in tali scariche, l'andamento della intensità sarà rappresentato dalla figura 402, e cioè sarà tale che i valori massimi della intensità raggiunti ad ogni mezza oscillazione sa-

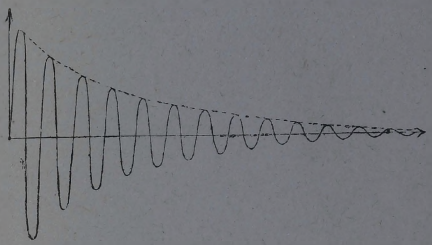


Fig. 402

ranno sempre più piccoli. La scarica dunque andrà via via *smorzandosi*.

395 — Esperienze di Feddersen. — Feddersen riuscì a verificare sperimentalmente i diversi caratteri assunti dalla scarica nelle varie condizioni del circuito, con un dispositivo mostrato nel suo schema dalla figura 403.

Il condensatore C è riunito ad un circuito di scarica costituito dal filo R e dallo spinterometro E, tra i cui elettrodi si provoca la scintilla.

Lo spinterometro è collocato verticalmente entro una camera oscura K munita di un obbiettivo O. E i raggi luminosi che, partendo da E, traversano l'obbiettivo, vengono riflessi dallo specchio S e vanno a formare in M l'immagine reale della scintilla sullo schermo LL.

Lo specchio poi può essere messo in rapidissima rotazione attorno all'asse verticale aa.

Se lo specchio S è fermo, l'immagine della scintilla in M si presenta come un tratto verticale luminoso di color bianco o rossastro nel centro, e variamente colorato vicino agli elettrodi, a seconda del metallo che li costituisce.

Ma se lo specchio ruota velocemente, ad es. nel senso che va da S ad S', sullo schermo si disegna un nastro luminoso orizzontale, da M verso M': questo intanto dimostra che la scintilla dura un certo tempo.

Se al posto dello schermo si pone una lastra fotografica,

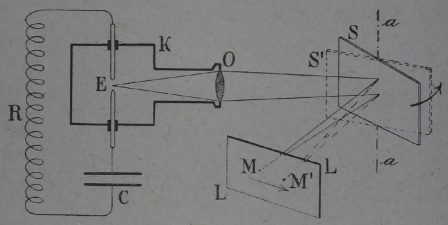


Fig. 403

ripetendo l'esperienza possiamo fissare stabilmente l'immagine del nastro. Osservandola ci convinciamo allora che la scarica — nei casi in cui è soddisfatta la disuguaglianza (19) — è realmente un fenomeno oscillatorio.

Sulla lastra vedremo, infatti, che il nastro è formato da tanti tratti luminosi verticali *equidistanti*, spesso tortuosi, che vanno da un elettrodo all'altro: sono le immagini di altrettante scintille elementari che hanno costituito la scarica. Ognuno di questi tratti, poi, è accompagnato da un ciuffo luminoso, ricurvo, partente da un solo elettrodo, e che si riconosce come dovuto a un'emissione di vapori metallici luminosi da parte di quell'elettrodo portato ad alta temperatura dalla scarica.

Siccome questi ciuffi non emanano tutti dallo stesso elettrodo, bensì *alternativamente* dall'uno e dall'altro, ne deduciamo che alternativamente l'uno e l'altro degli elettrodi fanno l'ufficio di elettrodo negativo (più luminoso), ossia appunto ne deduciamo che la scarica è un fenomeno oscillatorio.

Le figure 404 e 405 riproducono due fotografie di siffatte scintille, ottenute con uno specchio rotante colla velocità di 650 e 800 giri per secondo.

Conoscendo la velocità di rotazione dello specchio e la sua distanza dalla lastra, e misurando la distanza fra due ciuffi consecutivi, si può ricavare sperimentalmente il valore del periodo.

L'esperienza ha confermato pienamente il risultato teorico riferito al § 394.

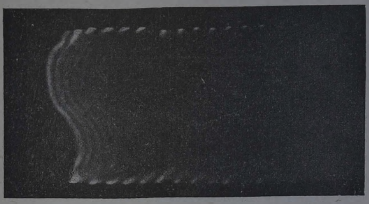


Fig. 404

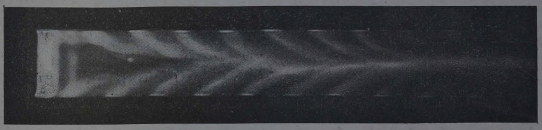


Fig. 405

Produzione e propagazione delle onde.

396 — **Oscillatore di Hertz.** — La scarica di un condensatore può dunque essere oscillante; e le oscillazioni possono essere molto rapide, rendendo piccole (§ 394) la capacità e la autoinduzione del circuito di scarica.

Con lo scopo di ottenere queste rapidissime oscillazioni, Hertz ha costruito l'apparecchio rappresentato nella figura 406.

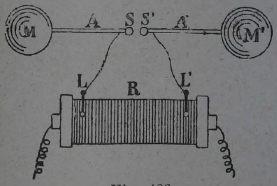


Fig. 406

Alle due aste metalliche A, A' sono unite le due sfere pure metalliche M, M' e le due sferette S, S'; il tutto è disposto come mostra la figura, intendendo che S sia posto a qualche millimetro soltanto di distanza da S'.

Riunendo ora A ed A' ai due serrafili L, L' di un rocchetto R di Ruhmkorff in azione, ad ogni apertura del primario una certa quantità di elettricità si porta sulle sfere M ed M'; se tale quantità è abbastanza grande, la differenza di potenziale

fra le sferette S ed S' cresce al punto, da fare avvenir fra esse la scintilla. Alla scarica prendono parte le quantità di elettricità che si trovano in M ed M', che sono conduttori di piccola capacità; essendo poi il circuito di scarica costituito dalle due aste A ed A', ed avendo quindi resistenza trascurabile, la scarica è allora oscillatoria, e di periodo brevissimo (§ 394).

Ora, questa scarica, o corrente, oscillante crea intorno a sè, come tutte le correnti, un campo magnetico (§ 333), che necessariamente oscilla, con lo stesso periodo della scarica.

D' altra parte le cariche elettriche in M ed M' creano all' intorno un campo elettrico (§ 362), anche questo necessariamente oscillante.

Per questa ragione l' apparecchio di Hertz si chiama *oscillatore*.

397 — **Onde elettromagnetiche.** — Ora, le linee di forza elettrica (§ 362) sono linee curve che vanno dall' una all' altra sfera, e giacciono in piani passanti per la retta congiungente i

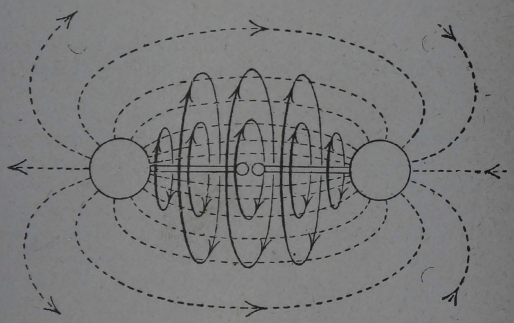


Fig. 407

centri delle due sfere; e le linee di forza magnetica (§ 333) sono cerchi perpendicolari a quella retta.

La figura 407 mostra con tratto punteggiato le linee di forza elettrica, e con tratto intero le linee di forza magnetica.

Se guardiamo allora quello che accade in un punto qualunque A (fig. 408) della retta OH passante per O e perpendicolare alla congiungente i centri di M e di M', vedremo subito che il campo elettrico in A sarà sempre diretto secondo la retta

e e', parallela alla congiungente *M M'*; e in un senso o nell'altro, a seconda del segno che hanno, all'istante considerato, le cariche elettriche poste in *M* ed in *M'*. La forza magnetica sarà invece sempre diretta secondo la *mm'*, perpendicolare ad *ee'* e ad *OH*, e in un senso o nell'altro, a seconda del senso che ha la corrente, fra *M* ed *M'*, nell'istante considerato.

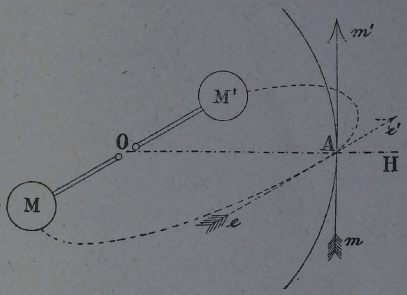


Fig. 408

Ma l'intensità ed il senso, sia della forza elettrica, sia della forza magnetica, variano periodicamente durante la scarica oscillante.

Ora, l'esperienza ha mostrato che tali variazioni del campo elettrico e del campo magnetico sono legate tra loro in modo indissolubile: non si hanno le une senza le altre. E si è trovato pure che queste variazioni alternative, dello stesso periodo, si propagano tutto attorno all'oscillatore con la stessa velocità, finita e costante per ogni dielettrico, tanto da generare delle vere e proprie onde, come quelle luminose. Tali onde si indicano col nome di *onde elettromagnetiche*, o di *onde Hertziane*.

398 — Risonatore di Hertz. — Si potranno rivelare con tutta facilità queste onde procedenti nello spazio, con l'esperienza seguente.

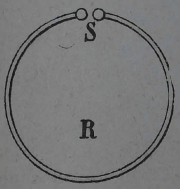


Fig. 409

Prendiamo un filo di rame *R* e pieghiamolo a cerchio, lasciando una piccola interruzione in *S* (fig. 409). Disponiamo quindi il cerchio in un punto qualunque (fig. 410), in modo che il suo piano sia perpendicolare al campo magnetico, la cui direzione è quella della freccia *mm'*; ad ogni scintilla in *O* ne vedremo comparire un'altra

in S, più o meno vivace a seconda delle dimensioni del cerchio. Si ha un massimo di scintilla in S per determinate dimensioni di questo circuito, e precisamente quando la sua capacità e la sua au-

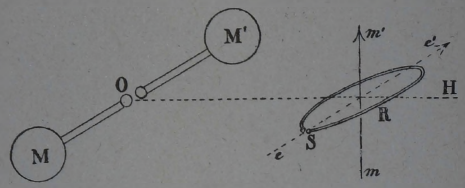


Fig. 410

toinduzione sono tali che, producendo in esso delle scariche, queste abbiano lo stesso periodo di quelle date dall' oscillatore adoperato.

Quindi, per analogia con ciò che avviene nel fenomeno della risonanza acustica (Vol. I, § 278), a un tale circuito è stato dato il nome di *risonatore*.

Lo splendore e la vivacità delle scintilline che scoccano in S è diversa a seconda del piano in cui si colloca il risonatore, e a seconda delle diverse posizioni in cui si pone la interruzione S. E ciò è ben naturale, quando si pensi che in certe posizioni il circuito sarà attraversato dalle sole linee di forza magnetica, in certe altre solo da quelle di forza elettrica; e in altre ancora sarà attraversato dalle due specie di linee insieme.

Per es.: se S è nella posizione indicata dalla figura 410, il risonatore non risponde alle variazioni del campo elettrico, perchè per effetto di esse gli estremi sono portati ad ogni istante

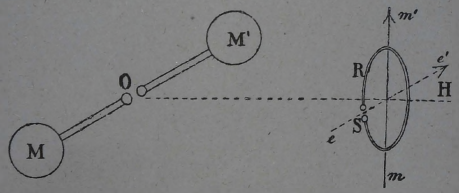


Fig. 411

al medesimo potenziale; ma invece il circuito diviene in tal caso sede di correnti elettriche, indotte dalle variazioni del flusso di induzione magnetica che lo attraversa (§ 367).

Se poi facciamo ruotare il risonatore di un angolo retto intorno al diametro ee' (fig. 411), esso non risentirà neppure

ora, per la stessa ragione, le variazioni del campo elettrico; e adesso nemmeno più le variazioni del flusso magnetico, perchè questo più non lo attraversa.

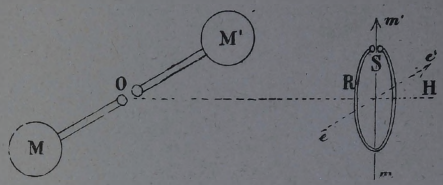


Fig. 412

Infine, lasciando il risonatore col proprio piano perpendicolare ad OH, portiamo in alto l'interruzione S (fig. 412): allora esso risentirà le variazioni del campo elettrico, e soltanto queste.

399 — Onde stazionarie. — Le oscillazioni elettromagnetiche si propagano — s'è detto — con velocità costante; e pos-

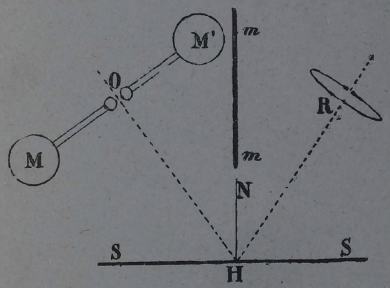


Fig. 413

siamo provarlo con la seguente esperienza, la quale ci darà pure il modo di misurare questa velocità, quando si conosca il periodo.

Poniamo in O (fig. 413) l'interruzione dell'oscillatore MM'; e in R il risonatore. Se nulla è interposto fra O ed R, quando si hanno scintille in O, ne compariscono anche in R.

Se però interponiamo tra R ed O una lastra metallica $m\ m$, le scintille in R cessano subito. La lastra intercetta le oscillazioni.

Poniamo in $S\ S$ una seconda lastra metallica molto grande, così orientata che gli angoli $O\ H\ N$, $N\ H\ R$ ($N\ H$ è la normale a $S\ S$ nel punto H) siano uguali. Le scintille ricompaiono in R. Variando l' orientazione di $S\ S$, le scintille tornano a sparire. Se ne conclude che la lastra $S\ S$ riflette le oscillazioni Hertziane, con la legge con la quale rifletterebbe la luce.

Disponiamo ora la lastra $S\ S$ perpendicolare alla retta $O\ H$ (fig. 414): le onde verranno riflesse verso O. Se siamo in pre-

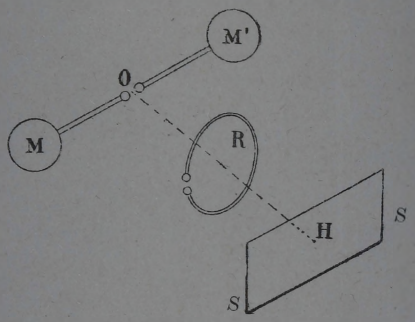


Fig. 414

senza di un fenomeno oscillatorio, dovremo poter realizzare l'esperienza delle onde stazionarie come in acustica (Vol. I, § 273): lo spazio fra O ed $S\ S$ si dovrà dividere in regioni nodali e in regioni ventrali. Ciò noi potremo veder subito, spostando il risonatore R lungo la retta $O\ H$: troveremo delle regioni in cui le scintille in R hanno la massima vivacità, e delle regioni in cui non avvengono. Queste regioni sono equidistanti: la loro distanza è quella che passa tra un ventre e un nodo, e cioè $\frac{1}{4}$ di lunghezza d' onda.

Questa esperienza dunque è una prova diretta che siamo in presenza di un vero e proprio fenomeno ondulatorio, e che la velocità di propagazione di queste oscillazioni è finita.

L' esperienza ora descritta ci può dare il valore della lunghezza d' onda; e d' altra parte possiamo trovare con lo specchio rotante (§ 395) il periodo di oscillazione. Quindi dalla relazione $\lambda = V\ .\ T$ avremo il valore della velocità V: essa

risulta di 300.000 chilometri al secondo, cioè uguale a quella della luce (§ 216).

Lo studio della propagazione di queste onde elettromagnetiche è stato approfondito. E si è potuto constatare che tutte le leggi che valgono per la propagazione delle onde luminose, valgono pure per quelle Hertziane. In particolare, anche queste *si riflettono*, *si rifrangono*, *interferiscono* come quelle luminose. Non possiamo però prolungarci su di un tale argomento; ci basta di averne accennato i risultati.

400 — **Coherer.** — Per rivelare con maggior sensibilità che non col risonatore di Hertz, le onde emesse da un oscillatore, si ricorre molto spesso all' artificio seguente. In un tubetto di vetro *T* (fig. 415) si introducono due elettrodi metallici *E*, *E'*, fra cui si interpone un po' di limatura *l* di qualche metallo non ossidabile — per es.: di argento o di nikel — in quantità tale, da restare assai libera nello spazio compreso fra gli elettrodi.

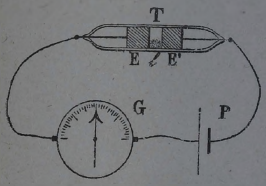


Fig. 415

Un siffatto tubetto in condizioni ordinarie presenta una grandissima resistenza alla corrente elettrica; tanto che, se lo inseriamo nel circuito di una pila *P* insieme con un galvanometro *G*, questo ci indicherà il passaggio di una corrente debolissima.

Se però in vicinanza di un tale apparecchio entra in azione un oscillatore, il tubetto *T* acquista subito una notevole conducibilità, e il galvanometro subisce una deviazione notevole.

Ma anche dopo cessata la propagazione delle onde elettromagnetiche, il tubetto mantiene la conducibilità acquistata. Si può tuttavia ricondurlo alle condizioni primitive, battendolo con un leggiero colpo, in modo da scuotere la limatura.

Un tale apparecchio è un rivelatore sensibilissimo di onde elettromagnetiche e si chiama *coherer*.

Telegrafo senza filo.

401 — Il coherer, quando sia posto in condizioni opportune, può risentire anche l' azione di onde che provengono da oscillatori collocati a centinaia di chilometri di distanza.

Questo fenomeno è stato utilizzato da Guglielmo Marconi nel suo *telegrafo senza filo*, per mettere insieme un apparato che permetta di trasmettere e ricevere segnalazioni a grandissima distanza. Daremo qui un cenno schematico della più semplice disposizione di una stazione trasmettitrice e di una ricevitrice.

402 — Stazione trasmettitrice. — In essa si trova una pila *P* (fig. 416), la cui corrente può essere inviata nel primario di un rocchetto di Ruhmkorff *R*, munito di un rapidissimo interruttore *I*.

Tenendo abbassato il tasto *T*, l' interruttore *I* agisce, ed il rocchetto produce nell' oscillatore *O* una serie di scintille elettriche.

Esse si susseguono a brevissima distanza di tempo l' una dall' altra: ogni scarica è oscillatoria, e quindi per ognuna di esse un seguito di onde elettromagnetiche viene lanciato nello spazio.

Per aumentare poi l' energia irraggiata tutto attorno, si è trovato molto efficace collegare una delle sferette dell' oscillatore con la terra, e l' altra con un lungo filo *A*, o sistema di fili, teso verso l' alto e sostenuto da un' antenna, detto *aereo*.

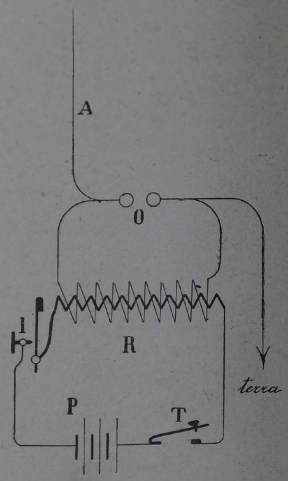


Fig. 416

403 — Stazione ricevitrice. — Le onde così lanciate tutto all' intorno nello spazio potranno arrivare alla stazione ricevitrice con intensità sufficiente per essere avvertite. Tale stazione è costituita (fig. 417) da un aereo *A*, simile a quello della stazione trasmettitrice, unito ad uno degli elettrodi di un coherer *C*, mentre l' altro elettrodo di questo comunica colla terra. Il coherer inoltre fa parte del circuito di una pila *P*, insieme con uno

speciale apparecchio, detto *relais*, costituito da un' elettrocalamita E, la cui ancora N può chiudere in a il circuito di un' altra pila P'.

Quando le onde investono l' aereo A, determinano ai suoi estremi delle variazioni di potenziale, che rendono conduttore il coherer C; e allora la corrente della pila P circola in E, magnetizza questa elettrocalamita, e l' ancora di ferro N viene attratta. E così questa chiude il circuito della pila P', nel quale sono inseriti una macchina telegrafica Morse, M, e l' apparecchio T, poco diverso da un campanello elettrico.

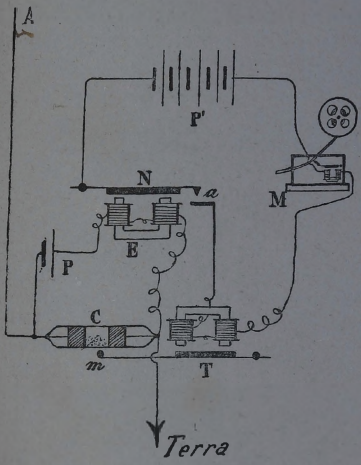


Fig. 417

Tale apparecchio, detto *scuotitore* o *trembleur*, ha l' ufficio di scuotere il coherer C, in modo che — appena cessata l' azione delle onde elettromagnetiche — esso ritorni allo stato naturale di grande resistenza elettrica.

Ecco dunque come procedono le cose. Se alla stazione trasmettitrice si tiene abbassato il tasto per *pochissimo tempo*, un breve seguito di onde arriva all' aereo A, il coherer diviene subito conduttore, l' ancora N viene attratta, si chiude in a il circuito di P', e la corrente circola in M e in T; ma poi subito — per gli urti dati dal martellino m di T — il coherer ritorna allo stato naturale, l' ancora N si risolleva, si riapre il circuito di T, e la macchina telegrafica M segna sulla carta un piccolo tratto.

Se, invece, alla stazione trasmettitrice si tiene abbassato il tasto per un *tempo alquanto più lungo*, l' oscillatore emette tante successioni di onde durante un tempo maggiore: l' ancora N resta quindi attratta in modo da tener chiuso per un tempo

più lungo il circuito di P' e la macchina telegrafica M segna sulla carta un tratto di maggiore lunghezza.

Combinando opportunamente tratti brevi e tratti lunghi, si formeranno anche qui i segni dell' alfabeto Morse.

Sia la stazione ricevitrice, come quella trasmettitrice, sono nella pratica più complicate di quanto non apparisca da questa descrizione sommaria; ma non possiamo entrare più addentro nel loro modo di funzionare.

Diremo soltanto che invece del coherer ora descritto, si usano ora in varî impianti altri rivelatori di onde, fondati su principî diversi, assai più sensibili del coherer e di funzionamento molto più sicuro.

Ioni ed elettroni.

Scariche elettriche nei gas.

404 — Ioni gassosi. — Vi è un grande numero di fenomeni — oltre quelli che già abbiamo enumerati a proposito dell'elettrolisi — in cui si riscontra l'esistenza di particelle materiali elettrizzate dell' uno o dell' altro segno.

Come nei liquidi, anche nei gas possono, in condizioni opportune, esistere tali particelle.

Poniamo, infatti, una candela accesa C (fig. 418) davanti alla pallina di un elettroscopio scarico E. Avvicinando alla candela, dalla parte opposta, un bastone B di ebanite, che sia stato strofinato con lana, vedremo subito che l' elettroscopio si carica permanentemente.

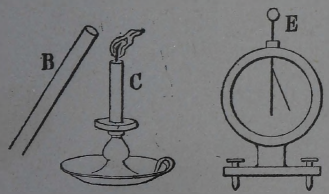


Fig. 418

Ci sarà facile riscontrare che la carica dell' elettroscopio è negativa, ed è quindi dovuta a particelle respinte dall' ebanite. Sostituendo all' ebanite un bastone di vetro elettrizzato, si trova che la carica assunta dall' elettroscopio è invece positiva.

Perciò nella fiamma, o, meglio, nei prodotti gassosi che si svolgono dalla fiamma della candela, esistono particelle elettrizzate positivamente e particelle elettrizzate negativamente.

Possiamo mostrare che anche i corpi incandescenti emettono particelle elettrizzate, eseguendo quest' altra semplice esperienza, dovuta al prof. Brunè.

Ricopriamo il vetro di una comune lampadina elettrica con uno strato di sostanza conduttrice (per es. grafite sospesa in acqua gommata) fino a poca distanza dalla ghiera d' ottone. Mettiamo poi questo strato in comunicazione con un elettroscopio, e comunichiamogli una carica positiva, mentre si tiene spenta la lampadina.

Quando allora questa si accende, l' elettroscopio si scarica con notevole rapidità. Se invece lo carichiamo di elettricità negativa, esso non si scarica nell' accender la lampada, se non quando la temperatura del filamento della lampada stessa aumenta fin verso il calor bianco.

Le particelle elettrizzate che con queste esperienze si rendono palesi, si chiamano *ioni*, per analogia con quelle che compariscono nelle soluzioni (§ 309); e il fenomeno della formazione degli ioni, prende il nome di *ionizzazione*.

Uno dei mezzi più comuni per produrre l' ionizzazione in un gas ci vien fornita dai *tubi di Crookes*. Essi consistono in ampolle di vetro *T* (fig. 419), di varia forma, nelle quali vengono saldati due o più elettrodi di metallo *A*, *B*. In queste ampolle si opera una rarefazione assai spinta, e poi si chiudono alla fiamma.

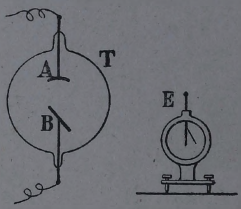


Fig. 419

Quando — mediante una macchina elettrostatica o un rocchetto di Ruhmkorff — si fa passare una scarica tra gli elettrodi *A* e *B*, nel gas esterno circostante al tubo di Crookes si produce rapidamente una quantità assai grande di ioni gassosi, che recano cariche sia positive che negative.

Poniamo in prossimità del tubo un elettroscopio *E*, capace, in condizioni normali, di serbare la carica per parecchie ore: esso si scarica invece in pochi secondi quando il tubo agisce. Infatti la pallina dell' elettroscopio, se sarà carica, ad esempio, positivamente, attirerà gli ioni negativi; e così la carica positiva dell' elettroscopio verrà tosto neutralizzata.

A riprova di ciò, prendiamo un tubo *T* (fig. 420), munito ad un' estremità di un imbuto *C*, ed all' altra di un'asticella *M* di metallo, tenuta bene isolata, e posta in comunicazione con

un elettroscopio carico *E*. Lungo il tubo si può stabilire una corrente d' aria, diretta verso *M*, servendoci di un aspiratore applicato alla tubulatura laterale *A*.

Di fronte all' imbuto *C* disponiamo un tubo di Crookes *R*, chiuso entro una scatola di piombo munita di una piccola apertura.

Se si fa allora funzionare il tubo *R* senza far circolare l' aria nell' interno del tubo *T*, l' elettroscopio resta carico. Ma se — mediante l' aspiratore — provochiamo una corrente diretta nel senso indicato nella figura 420 dalla freccia, l' elettroscopio si scarica rapidamente.

Questo dimostra che l' elettroscopio perde la sua carica per opera di particelle che sono generate nell' aria all' imbocca-

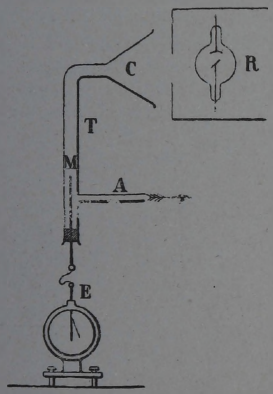


Fig. 420

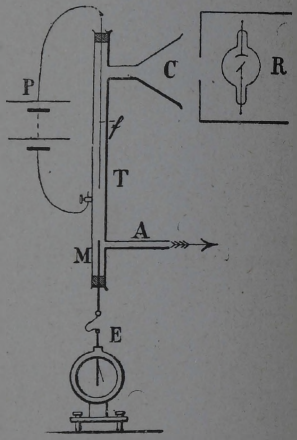


Fig. 421

tura dell' imbuto, e che dalla corrente vengono trascinate sull' asta *M*.

Ma se il tubo di metallo *T* è lungo e stretto, e posto in comunicazione col suolo, l' elettroscopio rimane ugualmente carico: questo dimostra che le particelle che scaricano l' elettroscopio perdono la loro proprietà venendo a contatto con dei conduttori a potenziale nullo.

Infine, se il tubo T è un largo tubo metallico, lungo l'asse del quale sia disposto un filo f anch'esso metallico (fig. 421), in condizioni ordinarie — se f è isolato — la corrente d'aria scarica l'elettroscopio; se invece — mediante una batteria P di pile o di accumulatori — si stabilisce tra il filo f e il tubo T una forte differenza di potenziale, l'elettroscopio non si scarica più. E ciò mostra che le particelle sono elettrizzate.

405 — **Cause della ionizzazione.** — L'ipotesi più probabile intorno alla produzione di queste particelle o *ioni gassosi*, si è che esse provengano dalla dissociazione molecolare, come già abbiamo supposto avvenire per gli ioni nelle soluzioni.

Ammettiamo, cioè, che gli ioni gassosi siano prodotti dallo scindersi della molecola gassosa in due parti, l'una carica di elettricità positiva *(ione positivo)*, e l'altra di elettricità negativa *(ione negativo)*.

Però, le parti in cui si scinde la molecola nella ionizzazione dei gas, si ritengono assai diverse da quelle in cui si scinde la molecola nella dissociazione degli elettroliti.

Infatti, negli elettroliti — che son sempre corpi composti — gli ioni positivi sono costituiti da atomi, o da aggruppamenti di atomi, sempre di specie diversa da quella che costituisce gli ioni negativi (es.: $(H_2)^+$ e $(SO_4)^-$). Invece la scissione delle molecole gassose si ha anche in quei gas che sono corpi semplici, e in tal caso gli ioni, tanto positivi che negativi, sono costituiti tutti da atomi della stessa specie.

E invero la scissione delle molecole gassose, ossia la *ionizzazione dei gas*, può avvenire in vari modi. Uno dei più comuni e importanti è quello della *ionizzazione per urto*. Sappiamo che se in un gas si stabilisce una conveniente differenza di potenziale — ad esempio, se si immergono nel gas stesso due conduttori metallici A, B (fig. 422) portati a differente livello elettrico — si ha il noto fenomeno della scarica elettrica, per cui avviene un trasporto di elettricità da un elettrodo all'altro. Tale trasporto viene effettuato per convezione da un'enorme quantità di ioni che si producono al primo istante in cui la scintilla incomincia.

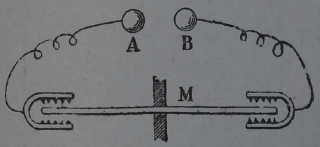


Fig. 422

Il fenomeno può trovare spiegazione nel fatto, posto in chiaro dall' esperienza, che in un gas, qualunque sieno le sue condizioni, si trova sempre un certo numero di ioni, che è d' ordinario molto piccolo. Quando nel gas fra i due elettrodi *A* e *B*, si stabilisce un campo elettrico, gli ioni vengono attratti, quelli di un segno da *A*, gli altri da *B*, con velocità che cresce man mano che la differenza di potenziale tra *A* e *B* si fa più grande.

Per effetto della velocità assunta dai pochi ioni presenti nel campo elettrico, hanno luogo urti tra questi e le molecole neutre, urti che avvengono con forza viva sempre maggiore al crescere della velocità degli ioni stessi. In questi urti le molecole neutre si rompono, e quindi si ha la produzione di nuovi ioni, i quali alla lor volta vanno ad aumentare il numero degli urti e delle dissociazioni: finchè poi, dopo un tempo straordinariamente breve, si produce il fenomeno finale, cioè la scintilla.

L'ipotesi ora accennata è tanto più naturale, in quanto che questo genere di ionizzazione è accompagnato da tutti quegli effetti che si hanno quando un proiettile va a colpire un ostacolo. Si ha infatti, nella ionizzazione per urto, produzione di luce e di calore.

406 — Varî aspetti della scarica nell' aria. — La diversa distribuzione degli ioni nell' ambiente in cui avviene la scarica può anche render ragione dei diversi aspetti che ha la scintilla a seconda delle circostanze. Così, se la scintilla scocca fra due elettrodi molto vicini, cioè se la distanza esplosiva è piccola, la scintilla consiste in un tratto rettilineo luminosissimo (fig. 423). Aumentando la distanza esplosiva, la scintilla prende l'aspetto

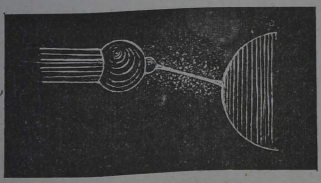


Fig. 423

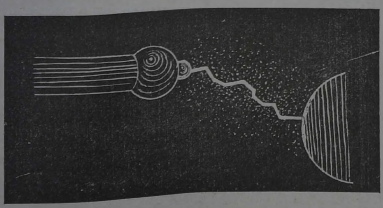


Fig. 424

di una linea spezzata (fig. 424); e per distanze maggiori lascia sfuggire lateralmente dei tratti luminosi, che partono sopratutto dagli angoli ove la scintilla si piega; cosicchè la scarica appare come ramificata (fig. 425).

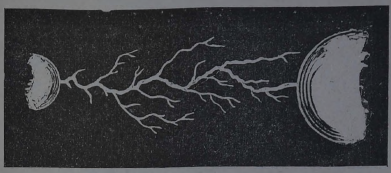


Fig. 425

Quando la capacità dei conduttori è piccola, aumentando notevolmente la distanza fra gli elettrodi, non si ha più la scintilla rumorosa. La scarica prende (fig. 426) la forma di fiocchi luminosi violacei che si possono rendere anche maggiori, se la scarica avviene fra delle punte.

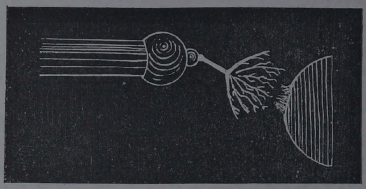


Fig. 426

407 — Altri effetti della scarica. — Oltre che *fenomeni luminosi*, la scarica produce anche degli *effetti termici*, che si possono mettere in evidenza mediante l' apparecchio mostrato dalla figura 427.

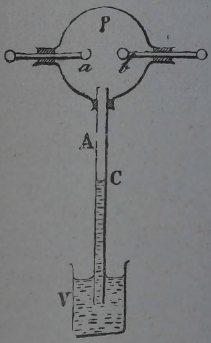


Fig. 427

Un pallone di vetro P è attraversato da due conduttori che terminano nell' interno del pallone con due sferette a, b. Il pallone è munito di un tubo sottile A, pieno fino in C di acqua colorata, e capovolto su di un vaso V.

Facendo scoccare tra a e b un discreto numero di scintille, si vede abbassare il livello del liquido nel cannello. Ciò è dovuto appunto al calore svolto nella scarica, pel quale si è dilatata l' aria nell' interno del pallone.

La scintilla può produrre inoltre *effetti meccanici*, che possono esser notevoli, se la scarica implica il trasporto di una grande quantità di elettricità, come può aversi nella scarica di una batteria di condensatori.

Si riesce con essa — con un conveniente dispositivo — a spezzare un pezzo di legno interposto fra gli elettrodi, e perfino a forare una grossa lastra di vetro.

408 — **Fulmine.** — Tale esperienza può anche servire a spiegare gli effetti disastrosi del fulmine, che non è se non un' enorme scintilla, in cui la quantità di elettricità messa in giuoco è grandissima.

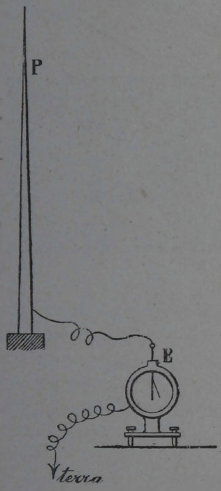


Fig. 428

Le nubi temporalesche, infatti, sono elettrizzate: ora positivamente, ora negativamente. E per provarlo si può impiegare un' asta conduttrice isolata, terminata in alto da una punta *P* (fig. 428) e drizzata su di un edificio. L' asta si collega col bottone di un elettroscopio *E* il cui involucro metallico è posto a terra.

Quando passa una nube temporalesca, per la nota azione delle punte (§ 267) le foglie dell' elettroscopio si vedono divergere: la loro elettricità è dello stesso segno di quella portata dalla nube.

Ora, se due nubi cariche di elettricità contrarie sono sufficientemente vicine, la scintilla scocca attraverso lo strato d' aria che le separa. Ma quando invece una nube fortemente carica passa in vicinanza del suolo, può darsi che la scintilla scocchi fra la nube e la terra: questa scintilla costituisce appunto il fulmine.

409 — **Parafulmine.** — Si può evitare la caduta del fulmine sugli edificî mediante il *parafulmine*.

Il parafulmine più semplice consiste in una lunga asta metallica verticale, terminata a punta nella parte superiore, drizzata sul tetto dell' edificio che si vuol proteggere, e in comunicazione metallica col suolo.

Quando una nube fortemente elettrizzata viene a passare sull' edificio, l' elettricità di nome contrario, indotta dalla nube nel suolo, sfugge per la punta e neutralizza più o meno completamente la carica della nube stessa.

Talvolta ciò basta ad impedire la caduta del fulmine.

Talaltra però il fulmine scocca egualmente; ma allora segue la via meno resistente, vale a dire l' asta del parafulmine ed il conduttore che va al suolo. Se l' impianto è ben fatto, l' edificio non viene danneggiato.

410 — **Segnalatori di scariche atmosferiche.** — Da qualche anno negli osservatori meteorologici è venuto in uso di registrare le scariche elettriche atmosferiche, anche quando il temporale è lontano: il che fu fatto per la prima volta dal prof. Boggio-Lera. Uno degli apparecchi adoperati è mostrato dalla figura 429, ed è dovuto al prof. Lancetta.

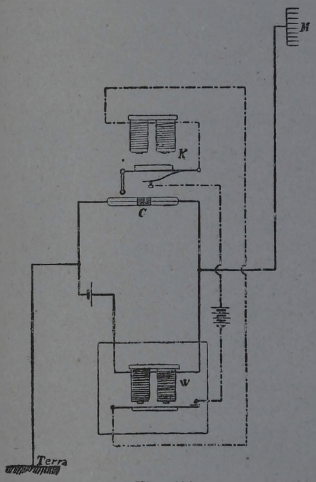


Fig. 429

In esso si ha una parte ricevitrice, ed una parte registratrice. La prima consta di un coherer sensibile *C* (§ 400), collegato da una parte colla terra e dall'altra con una lastra metallica *M* — munita di numerose punte — che serve da aereo.

La parte registratrice è simile a quella del telegrafo senza filo: e consta di un relais *W* e di un trembleur *K*. Il relais chiude un circuito che fa funzionare un apparecchio registratore.

411 — **Elettricità atmosferica in tempo sereno.** — Del resto, l' elettricità in seno all' aria esiste pure quando non vi è temporale. La cosa può dimostrarsi col dispositivo stesso della figura 428. Se si lascia l' apparecchio a sè, si trova che l' elettroscopio anche in tempo di calma si carica: e in tal caso sempre positivamente.

Se poi in una ascensione aeronautica si porta nella navicella del pallone un elettroscopio, unito ad un lungo filo metallico che si lascia pendere sotto la navicella, le foglie si caricano invece negativamente.

La spiegazione delle due esperienze è unica: tutto procede, infatti, come se la terra fosse carica negativamente. Giacchè, nella prima esperienza, l'asta isolata si elettrizza per influenza: l' elettricità negativa sfugge per la punta, mentre l' elettricità positiva rimane nell' elettroscopio. Nella seconda, la terra elettrizza il filo ed è l' elettricità positiva che si disperde.

Il fenomeno però si spiegherebbe ugualmente bene, anche ammettendo che le alte regioni dell' atmosfera fossero cariche positivamente.

412 — **Scarica nei gas rarefatti.** — Il movimento degli ioni sotto l' azione di un campo elettrico dà luogo, quando l' ionizzazione si produce in un gas rarefatto, a manifestazioni luminose, che per il loro svariato carattere attraggono subito l' attenzione del fisico.

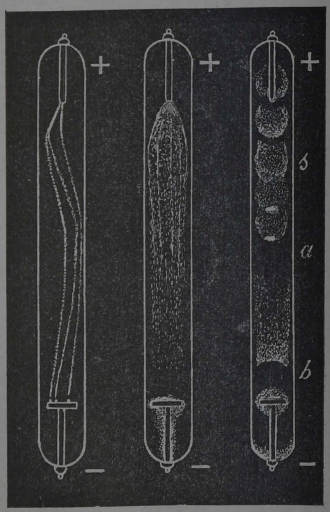


Fig. 430

Se si prende un tubo di vetro munito di elettrodi (fig. 430), e se, per mezzo di una buona pompa vi si opera la rarefazione, allora collegando i due elettrodi coi poli di una macchina elettrostatica, o meglio di un rocchetto di Ruhmkorff, si vede apparire un nastro lucente violaceo (una lunga scintilla), che va dall' uno all' altro elettrodo.

Se si fa crescere a poco a poco la rarefazione, il nastro si allarga; poi la luminosità invade tutto il tubo, mostrando che il numero delle particelle elettrizzate, che coi loro urti provocano manifestazioni di luce, cresce con la rarefazione.

Nello stesso tempo un' altra particolarità si osserva: la colonna luminosa non forma più una banda continua tra l'anodo e il catodo, ma presso quest' ultimo essa apparisce interrotta da uno spazio oscuro, che si chiama *spazio oscuro di Faraday*.

Proseguendo ancor più la rarefazione, l' aspetto della scarica si modifica, in un modo del tutto singolare: la colonna luminosa, a partire dall' anodo, apparisce frazionata e costituita da strati alternativamente luminosi ed oscuri. La scarica allora dicesi perciò *stratificata*.

Andando dall' anodo verso il catodo, si vede che alle *stratificazioni s* segue lo spazio oscuro *a* di Faraday; e a questo segue uno spazio luminoso, che è diviso dal catodo da un secondo spazio oscuro *b*, detto *spazio oscuro catodico*.

Le stratificazioni *s*, col progredire della rarefazione, divengono sempre più larghe e a contorni sempre meno netti, finchè, con un vuoto abbastanza spinto, spariscono totalmente. A questo punto la parete di vetro, nella regione prospiciente il catodo, diventa vivamente fluorescente.

413 — **Raggi catodici.** — Tale fluorescenza è dovuta a radiazioni che, partendo dalla parte del catodo, vanno a colpire la parete di vetro; per cui si è dato loro il nome di *raggi catodici*.

Essi sono costituiti da particelle cariche di elettricità negativa, che soltanto apparentemente sembrano emesse dal catodo. A rarefazioni corrispondenti a circa un milionesimo di atmosfera queste particelle assumono velocità grandissime.

Però, con un vuoto così spinto, essendo molto rare nel tubo le molecole gassose, tali particelle non subiscono che pochi urti, e ciò spiega l' assenza quasi completa di luminosità lungo il percorso dei raggi catodici, sebbene questi, a causa della loro enorme velocità, debbano possedere una notevole energia.

Lo studio di queste radiazioni ha potuto stabilire le seguenti proprietà:

I. *I raggi catodici partono dal catodo normalmente alla sua superficie, e si propagano in linea retta.*

La figura 431 rappresenta il tubo che serve a dimostrare tale proprietà. Il catodo *N* è costituito da una calotta sferica *a*

col centro di curvatura in O; un filo P, saldato nella parete superiore del tubo, funziona da anodo.

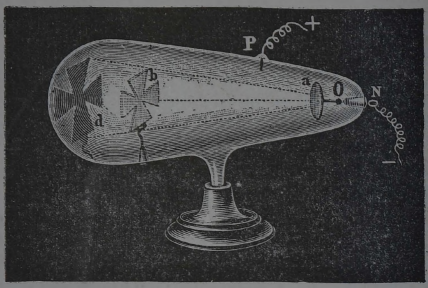


Fig. 431

Nell' interno del tubo, davanti al catodo, è posta una croce di alluminio b. Collegando N e P coi poli di un rocchetto di induzione, si vede sulla parete opposta ad O proiettarsi l' ombra geometrica d della croce b, come se i raggi luminosi partissero dal centro O di curvatura del catodo a.

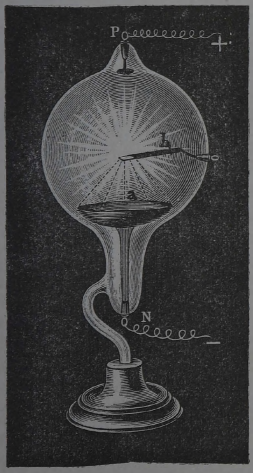


Fig. 432

II. *I raggi catodici possono produrre effetti termici.*

Per provar ciò si adopera un tubo di Crookes che ha per catodo una calotta sferica concava a (fig. 432), nel cui centro si trova una lastrina di platino b. I. raggi catodici, propagandosi normalmente alla superficie del catodo a, si concentrano su b, arroventando il platino, e qualche volta determinandone la fusione.

III. *I raggi catodici determinano effetti meccanici.* Ciò si dimostra ponendo sul cammino dei raggi catodici un mulinello mobilissimo e leggerissimo (fig. 433), preparato con palette di mica.

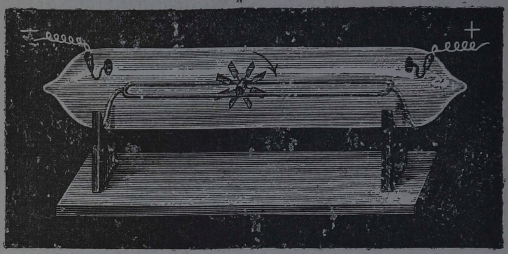


Fig. 433

Quando il tubo funziona, il mulinello si mette in rapido movimento, nel senso indicato dalla freccia.

IV. *I raggi catodici trasportano una carica negativa.* Di fronte al catodo, in un tubo a vuoto (fig. 434), è posto un piccolo cilindro *A* di Faraday (§ 251) in comunicazione con un elettroscopio a foglie d' oro *E*.

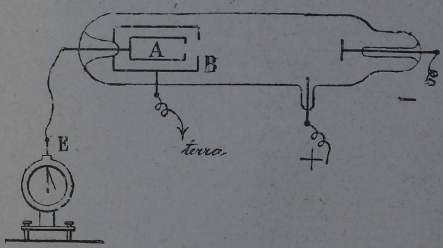


Fig. 434

Per evitare ogni influenza esterna, il tubo *A* è tenuto dentro un secondo cilindro di metallo *B* posto a terra. L' anodo poi è costituito da un reoforo saldato nella parete inferiore del tubo.

Quando il tubo funziona, l' elettroscopio si carica negativamente. Ciò dimostra appunto che le particelle catodiche portano delle cariche negative.

V. *I raggi catodici sono deviati da un campo elettrico.*

Ciò si può dimostrare conducendo il fascio catodico a passare fra due lastrine *A*, *B* (fig. 435) collegate una col polo positivo, l'altra con quello negativo di una batteria di pile o di accumulatori. La deviazione è resa manifesta dallo sposta-

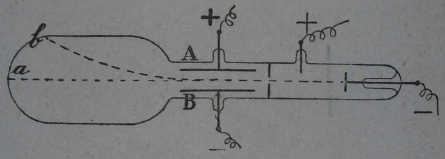


Fig. 435

mento sul vetro della macchia fluorescente, che da *a* si sposta in *b*, non appena si stabilisce la differenza di potenziale fra *A* e *B*.

VI. *I raggi catodici sono deviati da un campo magnetico.*

Si ottiene, infatti, uno spostamento della macchia fluorescente in un tubo della forma indicata dalla figura 436, quando esso venga posto fra le branche di una calamita nel modo indi-

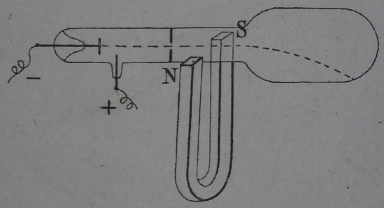


Fig. 436

cato dalla figura stessa; si constata che la deviazione ha luogo normalmente alla direzione del campo magnetico, come se si trattasse di un filo flessibile percorso da una corrente elettrica diretta verso il catodo.

414 — **Raggi anodici.** — La teoria delle dissociazioni molecolari esige che anche nei tubi a vuoto, insieme con le particelle negative, che costituiscono i raggi catodici, si producano particelle positive. Per rivelarle si fa uso di tubi il cui catodo

CC è provvisto di piccoli fori (fig. 437, α). Si osserva allora che — contemporaneamente ai raggi catodici che si propagano verso la regione *A* del tubo nella quale trovasi l'anodo — attraverso ai fori del catodo *CC* si propaga una debole luminosità verso la regione *B*.

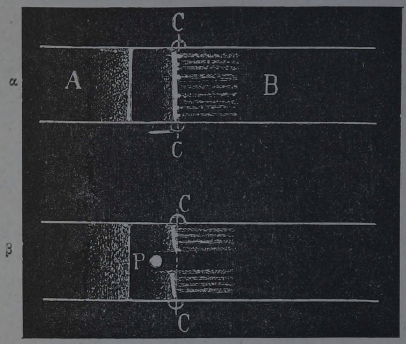


Fig. 437

In tal modo, in questa regione posteriore al catodo, si hanno tanti filamenti luminosi, ciascuno in corrispondenza di un foro.

Apparentemente questi filamenti hanno origine dal catodo; in effetto, però, essi provengono dalla regione compresa fra l'anodo e il catodo: tanto è vero che, se si pone un corpo *P* (fig. 437, β) davanti al catodo, scompariscono quei filamenti che sembravano partire dai fori posti in corrispondenza di *P*.

Questi raggi che si propagano verso *B* — ossia dalla parte opposta a quella dell'anodo — sono anch'essi deviati da un campo elettrico e da un campo magnetico, in modo analogo ai raggi catodici; senonchè le deviazioni avvengono in senso opposto di quelle dei raggi catodici.

Ciò suggerisce che questi nuovi raggi sieno costituiti da particelle elettrizzate positivamente, anzichè negativamente. Ma del resto, tal cosa si può mostrare coll'esperienza diretta, usando un dispositivo simile a quello che ha servito a rivelare la carica dei raggi catodici.

Perciò i raggi che destano la luminosità al di dietro del catodo vengono chiamati *raggi anodici*.

Qualche volta essi vengono anche detti *raggi di Goldstein* dal nome del loro scopritore, od anche *raggi canali*, pel fatto che essi sembrano partire dai fori.

415 — Velocità, carica, e massa dei raggi anodici e catodici. — Nell'ipotesi assai verosimile che i raggi anodici e i raggi catodici sieno dovuti al movimento di particelle elettrizzate, mediante ricerche assai delicate e di cui qui non è possibile riferire per esteso, si è potuto stabilire quanto segue:

1.° I raggi anodici hanno masse dello stesso ordine di grandezza di quelle degli atomi dei gas da cui provengono.

2.° La carica dei raggi anodici è all'incirca $1{,}1 \cdot 10^{-19}$ coulomb (§ 258). Ed è approssimativamente quella che ha un atomo di idrogeno nell'elettrolisi.

3.° La velocità dei raggi anodici ha diversi valori, a seconda delle condizioni dell'esperienza; in ogni caso si mantiene inferiore a 10.000 chilometri per secondo.

Per i raggi catodici invece si è arrivati alle seguenti conclusioni:

1.° La massa dei raggi catodici è circa 2000 volte più piccola di quella dell'atomo d'idrogeno.

3.° La carica elettrica dei raggi catodici si può, a meno degli errori di esperienza, ritenere uguale a quella che ha un atomo di idrogeno nella dissociazione elettrolitica (§ 309).

3.° La velocità dei raggi catodici varia con le condizioni dell'esperienza, e nei tubi a vuoto si mantiene tra 22000 e 100000 chilometri al secondo.

416 — Corpuscoli. - Elettroni. — Ora, il risultato precedente è assai significativo.

La massa di una particella catodica deve intanto essere 2000 volte più piccola di quella di un atomo di idrogeno; la particella catodica non è quindi se non una frazione dell'atomo chimico.

Inoltre, siccome la massa e la carica dei raggi catodici si mantengono costanti, qualunque sia il gas da cui essi provengono, dobbiamo concludere che la particella catodica è sempre la stessa, qualunque sia la specie atomica dalla quale deriva.

Ciò porta a ritenere che gli atomi dei corpi, qualunque sia la loro natura, siano formati di particelle materiali aventi individualità propria, dotate tutte della stessa massa e della stessa carica elettrica.

A queste particelle finora non scisse, di massa circa 2000 volte più piccola di quella dell'atomo di idrogeno, e che appaiono come i costituenti degli atomi di tutte le sostanze conosciute, si dà il nome di *corpuscoli*, e qualche volta il nome di *elettroni*. Però oggi è invalso l' uso di designare col nome di *elettrone* la sola carica elettrica che ognun di essi porta, e che è la carica elettrica più piccola colla quale finora ci siamo trovati in presenza.

Perciò colla parola elettrone si viene piuttosto a designare l' *atomo di elettricità*.

417 — **Raggi di Röntgen.** — In un tubo di Crookes, la regione del vetro colpita dal bombardamento delle particelle catodiche è sede di un fenomeno importantissimo, che fu scoperto da Röntgen; da essa, cioè, partono speciali radiazioni invisibili, che sono state chiamate *raggi di Röntgen* o *raggi X*.

Essi non si generano soltanto nel vetro; ma si producono ogni volta che i raggi catodici incontrano un ostacolo.

Le proprietà di tali radiazioni sono, in breve, le seguenti:

1.° I raggi X partono da qualunque punto che vien colpito dai raggi catodici, e si propagano come la luce in linea retta, dirigendosi in tutti i sensi.

2.° Nel loro percorso vengono assorbiti più o meno dai corpi che incontrano. La maggior parte dei corpi però è per essi trasparente; solo i metalli più pesanti, sotto sufficiente spessore, possono dirsi opachi pei raggi X.

3.° Essi destano la fluorescenza in alcuni corpi, come il platinocianuro di bario, il solfuro di zinco, ecc.

4.° Esercitano una forte azione fotografica sui sali di argento capaci di essere impressionati dalla luce ordinaria.

5.° Non subiscono nessuna deviazione, nè per parte di un campo elettrico, nè per parte di un campo magnetico.

6.° Non sono suscettibili nè di riflessione, nè di rifrazione regolare.

7.° Ionizzano fortemente i gas da essi attraversati.

8.° Incontrando un corpo capace di assorbirli, ad esempio una lastra di piombo, lo riscaldano lievemente, e danno luogo a radiazioni della stessa natura della radiazione incidente.

Si ritiene per questi fatti che i raggi X sieno impulsi disordinati e non periodici dell'etere; essi si propagano colla velocità della luce. L' origine di tali impulsi si dovrebbe attribuire agli urti delle particelle catodiche contro il vetro od altro

ostacolo interposto sul cammino dei raggi catodici. Tale teoria però non è da tutti oggi accettata.

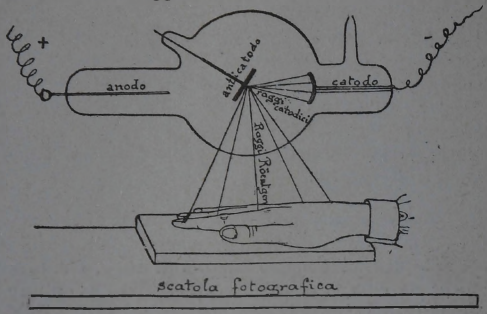


Fig. 438

I raggi X hanno ricevuto in pratica notevoli applicazioni.

Fig. 439

Il grado di trasparenza che hanno per questi nuovi raggi molti corpi che sono opachi per la luce ordinaria, come il legno, la carta, i tessuti organici, i metalli leggeri, ecc., unito alla proprietà dei raggi X, di rendere luminoso il platinocianuro di bario e di impressionare le lastre fotografiche, ha permesso la visione e la fotografia (*radiografia*) dei corpi opachi nascosti entro involti non trasparenti per la luce ordinaria.

La figura 438 mostra il tubo a raggi X che serve a tale scopo, e il modo di prendere la radiografia delle ossa, per es., di una mano, le quali sono meno trasparenti delle parti molli del nostro

corpo. E la figura 439 mostra una di tali radiografie ottenuta dal prof. Schincaglia.

418 — **Aurore polari.** — Prima di abbandonare l'argomento delle scariche nei gas rarefatti, vogliamo accennare ad un grandioso fenomeno che si verifica talora ai limiti estremi dell'atmosfera : l' aurora polare.

Nelle alte latitudini succede spesso che nella notte il cielo si illumini. Dalla volta celeste si vedono allora pendere larghe cortine di luce variopinta (fig. 440), che richiama alla mente

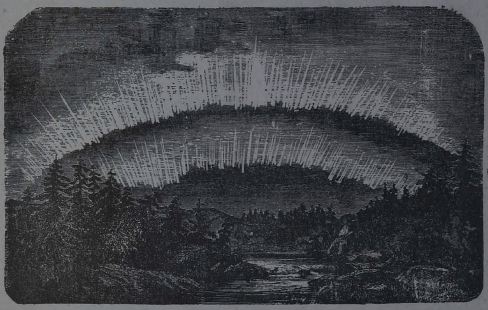


Fig. 440

la luminosità che vediamo comparire nei tubi a vuoto. Tale rassomiglianza porta a supporre che questo fenomeno sia dovuto ad un passaggio di elettricità nelle alte regioni dell' atmosfera.

La spiegazione sembra tanto più plausibile in quanto che le aurore polari sono sempre accompagnate da perturbazioni dell' ago magnetico, che si muove disordinatamente, come se delle correnti elettriche venissero in vario senso a percorrere in prossimità di esso.

Per questo occorre che i più alti strati dell' atmosfera subiscano una forte ionizzazione, che da alcuni vorrebbe attribuirsi a torrenti di elettroni lanciati dal sole. Ma tale ipotesi è quanto mai dubbia, e il fenomeno rimane per ora senza una spiegazione ben fondata.

Radioattività.

419 — Per la produzione dei raggi anodici e catodici e dei raggi X, occorre spendere una certa quantità di energia: essa proviene da quella che viene fornita alla macchina o al rocchetto di induzione, coi quali si eccitano i tubi a vuoto.

Ma Becquerel scoprì che i sali di *uranio* emettono spontaneamente, cioè *senza che venga fornita energia dall' esterno*, radiazioni singolari, che per molti caratteri sono da ritenersi della stessa natura di quelle da noi or ora studiate.

Poco dopo fu scoperto che anche il *torio* ha le stesse proprietà dell' uranio.

La Sig. Curie fece poi una constatazione interessantissima, che cioè l' intensità delle radiazioni emesse da un dato sale di torio o di uranio, o, come si dice, l' *attività* di quel dato sale, è proporzionale al peso dell' elemento metallico (torio o uranio) in esso contenuto.

Ora, la Curie stessa constatò che certi minerali contenenti uranio avevano una attività tre volte superiore a quella dell' uranio metallico. Perciò l' attività loro non poteva essere dovuta ad uranio, ma ad un altro elemento più attivo.

Partendo da questa considerazione, i coniugi Curie riuscirono ad isolare, da circa una tonnellata di minerale, dodici centigrammi di cloruro di un nuovo elemento al quale fu dato il nome di *radio*.

L' attività del cloruro di radio è più di un milione di volte superiore a quella dell' uranio metallico.

Del radio venne studiato lo spettro (§ 226), che si mostrò dissimile da quello degli elementi conosciuti: ciò rendeva indubitabile la sua esistenza come nuovo elemento. Il suo peso atomico fu determinato dalla Curie e fu trovato di 226,5.

Durante il trattamento dei minerali radiferi si trovò inoltre un altro elemento, che per molte ragioni si mostrò diverso dal radio. Ad esso fu dato il nome di *polonio*; però non è stato ancora isolato allo stato di sale puro. Infine, si scoprì ancora un nuovo principio attivo, al quale si diede il nome di *attinio*.

Tutti questi corpi vengono designati col nome di *corpi radioattivi*. Essi si riconoscono oggi facilmente dai caratteri delle loro radiazioni, o meglio dal modo con cui varia col tempo l' intensità delle radiazioni stesse.

420 — **Irraggiamento dei corpi radioattivi.** — L' irraggiamento delle sostanze radioattive è di natura complessa; in esso si distinguono tre specie di radiazioni, che sono dette raggi α, β e γ.

I raggi α son dovuti a particelle che trasportano cariche positive e che sono lanciate dal corpo radioattivo con grande velocità; essi hanno quindi tutti i caratteri dei raggi anodici.

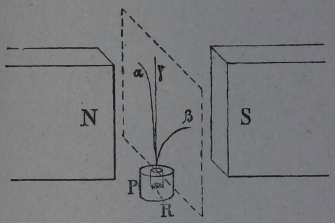


Fig. 441

I raggi β sono dovuti a particelle negative, lanciate con velocità enorme; essi hanno le proprietà dei raggi catodici.

I raggi γ non portano carica elettrica, e si comportano come i raggi X.

Per provare la complessità dell'irraggiamento dei corpi radioattivi, poniamo un po' di radio *R* nel fondo di una cavità cilindrica praticata in un blocco di piombo *P* (fig. 441). Dall' orifizio della cavità uscirà un fascio di raggi in cui si sovrappongono radiazioni α, β e γ. Se facciamo passare questo pennello in un campo magnetico come mostra la figura stessa, il fascio si sparpaglierà, e i raggi α e β verranno piegati in senso fra loro opposto, mentre i raggi γ proseguiranno il loro cammino rettilineo.

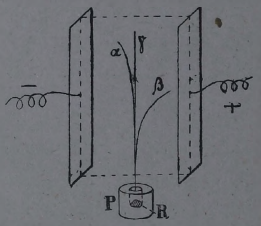


Fig. 442

Un' azione simile viene esercitata da un campo elettrico, come mostra la figura 442.

Raggi α. — Le particelle α sono dotate di una massa effettiva relativamente molto grande, ed in conseguenza della loro inerzia subiscono deviazioni appena apprezzabili.

Il Rutherford ha dimostrato con elegantissime esperienze che i raggi α provenienti dai vari corpi radioattivi hanno tutti la stessa massa, che coincide con quella di un atomo di elio.

Cioè, le particelle α hanno una massa 4 volte maggiore di quella di un atomo di idrogeno. La carica elettrica da esse portata è doppia di quella di un elettrone, e la loro velocità è circa $^1/_{10}$ di quella della luce.

Una proprietà poi caratteristica dei raggi α è quella di destare la scintillazione del solfuro di zinco esagonale. Uno schermo spalmato con tale sostanza e colpito dai raggi α, quando venga con una lente osservato al buio, si presenta costellato di innumerevoli scintilline, che appariscono e scompariscono, ora in un punto ora in un altro, dando l' apparenza di uno scintillante cielo stellato.

Raggi β — I raggi β sono in fondo veri raggi catodici che si propagano liberamente nell' aria; senonchè essi sono molto più penetranti, ed hanno una velocità superiore a quella dei raggi catodici dei tubi di Crookes. Tale velocità varia dai $^4/_5$ ai $^9/_{10}$ di quella della luce.

Si è constatato che la massa delle particelle β è circa $^1/_{2000}$ di quella dell' atomo di idrogeno; la carica da essi portata è sempre quella di un elettrone.

Raggi γ — I raggi γ non sono che raggi X più penetranti, ed accompagnano costantemente i raggi β.

Così, mentre si son potuti ottenere dei preparati radioattivi, come il polonio, che emettono solo raggi α, non si è mai riscontrato che alcun preparato emetta solo raggi β, o solo raggi γ.

421 — **Emanazioni radioattive.** — I prodotti di torio, di radio e di attinio, insieme coi raggi α, β e γ emettono continuamente una specie di gas molto rarefatto, chiamato *emanazione*, il quale è anch' esso fortemente radioattivo, come si può agevolmente dimostrare isolando questo gas.

Ciò si fa asportando l' aria che circonda il prodotto radioattivo, e nella quale l' emanazione si trova ad uno stato di diluizione estrema.

La radioattività dell' emanazione si va però distruggendo col tempo. Così, ad es., nel caso del radio, l'emanazione da esso prodotta rimane occlusa nella massa del sale, e man mano va sparendo mentre se ne produce della nuova. Si raggiungerà, per così dire, l' equilibrio, quando la quantità prodotta sarà uguale alla quantità scomparsa nello stesso tempo.

Ma l' emanazione si può totalmente rimuovere dal sale di radio, portando questo a temperatura elevata. Si osserva allora che il sale di radio ha perduto circa $^3/_4$ della propria attività. Se si è avuto cura di raccogliere l' emanazione, si constata che questi $^3/_4$ sono rimasti in essa.

Il radio residuo emette solo raggi α. Ma, lasciando a sè il sale e l' emanazione così estratta, si trova che, man mano che l' emanazione isolata perde l' attività, il radio ripristina la sua propria. Dopo circa un mese, dell' emanazione estratta non rimane più traccia rivelabile, mentre il radio si è rifornito della provvista normale di emanazione, che può essere nuovamente estratta.

Dunque *il radio produce continuamente emanazione*: cioè *gli atomi di radio vanno lentamente trasformandosi in atomi di emanazione*. L' emanazione però resta, in condizioni normali, imprigionata nella massa del sale in quantità costante, per l' equilibrio che vi è tra quella formata e quella distrutta.

L' emanazione del radio si condensa alla temperatura di — 150° e così può essere separata dall' aria e dagli altri gas dell' atmosfera. Ramsay riuscì a dimostrare che essa obbedisce alla legge di Boyle come un vero gas, e che ha uno spettro diverso da quello del radio. Dunque l' emanazione è un nuovo elemento.

Essa però va continuamente sparendo, riducendosi a metà in 3,9 giorni; ma fu scoperto che contemporaneamente si produce una quantità corrispondente del gas *elio*, il cui volume è triplo di quello dell' emanazione scomparsa.

Questa scoperta, come quella che provava la derivazione di un dato atomo da atomi di specie chimica diversa, fu da principio molto contestata; ma oggidì la produzione dell' elio da parte dell' emanazione è un fatto indiscutibile.

L' *elio* è costituito dalle particelle α che vengono emesse dall' emanazione e che hanno perduto la loro carica.

422 — Radioattività indotta. — Un corpo non radioattivo, tenuto per un poco in un ambiente che contenga una emanazione radioattiva, diventa poi radioattivo per qualche tempo.

A questa radioattività si dà il nome di *radioattività indotta*.

Ormai è posto fuori di dubbio che essa è dovuta ad un sottile deposito di una sostanza solida radioattiva, che si separa dall' emanazione, nello stesso tempo che da questa si forma l'elio.

423 — Disintegrazione radioattiva. — Il fenomeno però è complicato e molto più generale. Si deve ai lavori di Rutherford se oggi siamo finalmente giunti a chiarirne i particolari, e a trovare la spiegazione di questo processo.

Secondo la nuova teoria, l' atomo chimico non è un qualche cosa di semplice, ma un edificio molto complesso in cui gli elettroni entrano a far parte come elementi costituenti.

Tale struttura ha un assetto straordinariamente stabile per gli atomi delle sostanze non radioattive, talchè sono necessarie quantità di energia relativamente grandi, per scindere da un atomo un elettrone, come succede nei tubi a vuoto.

L' atomo delle sostanze radioattive ha invece un assetto instabilissimo, e perciò è continuamente soggetto a mutamenti di struttura. L' atomo radioattivo, cioè, è soggetto ad una continua e spontanea *disintegrazione*, e passa da uno stato ad un altro per l' espulsione di particelle α o β, o anche senza espulsione di particelle, per semplice mutamento di configurazione interna.

Naturalmente, ad ogni passaggio di stato l' atomo si modifica e cambia anche le proprietà chimiche e fisiche: insomma viene ad appartenere ad una specie chimica diversa.

Il Rutherford anzi, con una serie di ricerche ingegnosissime, riuscì a stabilire, per così dire, la genesi degli elementi radioattivi.

Così, ad esempio, dall' atomo di uranio, per l'espulsione di una particella α, si ha l' atomo di un altro elemento detto *radio uranio*. Questo è di struttura instabilissima, e cambia assetto senza emissione di raggi, trasformandosi in *uranio X*.

L' uranio X emette raggi β e quindi raggi γ, mutandosi in *jonio*. L' jonio per l' espulsione di una particella α si trasforma nell' atomo del *radio*. L' atomo del radio dà luogo all' atomo di *emanazione* espellendo un' altra particella α. Dall' emanazione si hanno poi, generati l' uno dall' altro, diversi atomi radioattivi, che si susseguono nell'ordine seguente: *radio A*, *radio B*, *radio C*, *radio D*, *radio E*, e *radio F*.

L' ultimo, il *radio F*, coincide col *polonio*.

Il polonio dunque è l' ultimo derivato della famiglia di cui l' uranio è il capostipite.

L' albero genealogico, per così dire, di questa famiglia è dato nella figura 443.

Il torio e l' attinio, analogamente, sono capostipiti di due altre famiglie di cui è inutile qui riferire dettagliatamente.

Tutti questi elementi, per trasformarsi l'uno nell'altro impiegano un tempo più o meno lungo, sebbene seguano tutti una medesima legge.

Così, una data massa di radio impiega 1700 anni circa prima che una metà dei suoi atomi si sieno convertiti in atomi di emanazione; mentre, ad es., metà degli atomi di una data massa di emanazione, in 3,9 giorni si convertono in atomi di radio *A*.

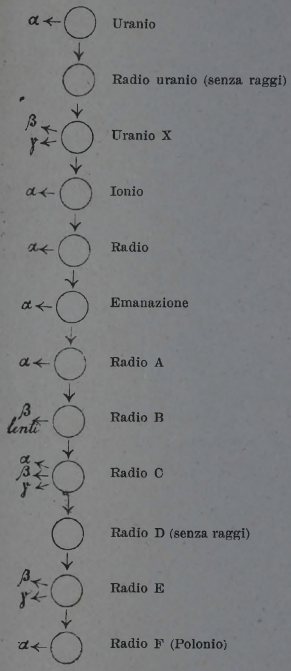


Fig. 443

424 — Calore svolto dal radio. Energia interatomica. — Queste trasformazioni avvengono con un enorme sviluppo di calore.

La Sig. Curie trovò che il radio svolge calore continuamente, tanto da raggiungere circa 100 piccole calorie all'ora, per ogni grammo di bromuro di radio.

Questo calore si svolge negli urti che subiscono le particelle α contro gli atomi stessi del radio; perciò è il corrispettivo dell'energia posseduta dalle particelle α. In confronto di questa è trascurabile l'energia posseduta dalle particelle β.

Si può ora presentare la seguente domanda: dato il principio della conservazione dell'energia, donde viene attinta l'energia posseduta dalle particelle, che nel processo radioattivo si producono senza dispendio di energia esterna? Si è pensato, per risolvere la difficoltà, che l'atomo sia da considerarsi come un serbatoio di energia.

L'espulsione delle particelle α e β, colla velocità enorme che loro compete, si fa a spese della provvista di energia

posseduta dall' atomo, la quale viene perciò diminuita ad ogni trasformazione subita dall' atomo stesso pel processo di disintegrazione radioattiva.

L' energia che si trova accumulata negli atomi è addirittura enorme. Si calcola che l' emanazione contenuta in un grammo di radio in equilibrio radioattivo svolga circa 10 mila piccole calorie prima di distruggersi interamente.

Una tale energia è pari a 8 milioni di volte il calore che si può svolgere da un miscuglio di gas tonante che occupi lo stesso volume dell' emanazione.

Tale provvista di energia però non è ceduta dagli atomi, almeno in quantità notevole, se non nei processi di disintegrazione, che noi finora mediante nessun agente sappiamo nè ritardare nè accelerare. Ad essa si dà il nome di *energia interatomica*.

Concludendo, si può ritenere che la trasformazione degli elementi chimici l' uno nell' altro si effettua realmente in natura; e sempre in modo tale, che un elemento più pesante si trasforma in un elemento di peso atomico minore.

Da questo punto di vista non riesce più assurdo il pensare che sia possibile alla fine trasformare in oro elementi di peso atomico più elevato.

Il sogno degli antichi alchimisti alla luce delle moderne teorie non appare perciò un' aspirazione insensata. Qualora però si realizzasse, l' energia che nella trasformazione si svilupperebbe sarebbe in quantità così enorme, da rendere in suo confronto trascurabile il valore dell' oro prodotto.

INDICE

CALORE.

La temperatura dei corpi . . . . . *Pag.* 5
Termometro . . . . . » 8
Scale termometriche . . . . . » 10

Dilatazione lineare dei solidi . . . . . » 12

Dilatazione cubica . . . . . » 16

Dilatazione assoluta e dilatazione apparente dei liquidi . » 18
Coefficiente di dilatazione del mercurio . . . . . » 21

Dilatazione dei gas . . . . . » 23

Leggi di Gay-Lussac . . . . . » 24
Variazione di tensione dei gas riscaldati a volume costante » 25
Termometro a gas . . . . . » 28
Equazione caratteristica dei gas . . . . . » 30

Quantità di calore dei corpi . . . . . » 31

Caloria. — Calorimetro a ghiaccio . . . . . » 32
Capacità termica e calore specifico . . . . . » 34
Calorimetro di Bunsen . . . . . » 35
Metodo delle mescolanze per la misura del calore specifico » 36
Legge di Dulong e Petit . . . . . » 38

Trasmissione del calore . . . . . » 40

Conduzione . . . . . » 40
Irraggiamento . . . . . » 43
Convezione . . . . . » 46

Mutamenti di stato . . . . . » 46

Fusione . . . . . » 46
Solidificazione . . . . . » 48
Soluzione . . . . . » 52
Evaporazione . . . . . » 55

Temperatura e tensione dei vapori . . . . . *Pag.* 57
Densità dei vapori . . . . . » 58
Ebollizione . . . . . » 63
Ebollizione ed evaporazione delle soluzioni . . . . » 67
Liquefazione dei gas . . . . . » 68
Temperatura critica . . . . . » 70
Liquefazione dell' aria . . . . . » 72
Fabbricazione del ghiaccio artificiale . . . . . » 75

Equivalente meccanico del calore . . . . . » 76

Principio di Mayer . . . . . » 76
Energia interna . . . . . » 80
Temperatura assoluta . . . . . » 83
Calori specifici dei gas . . . . . » 84

Macchine termiche . . . . . » 85

Macchine a vapore . . . . . » 85
Motori a scóppio . . . . . » 88

Sorgenti di calore . . . . . » 89

Calore svolto dalle reazioni chimiche . . . . . » 89
Calore animale . . . . . » 90
Calore solare . . . . . » 91

METEOROLOGIA.

Stato termico dell' atmosfera . . . . . » 93
Temperatura media . . . . . » 95

Movimenti atmosferici . . . . . » 98

Umidità atmosferica . . . . . » 100

Umidità assoluta e umidità relativa . . . . . » 100

Meteore acquee . . . . . » 104

OTTICA.

Assorbimento, diffusione e riflessione della luce . . . » 109

Propagazione rettilinea della luce . . . . . » 110

Ombra e penombra . . . . . » 111
Ecclissi . . . . . » 112

Fotometria . . . . . » 113

Legge delle distanze . . . . . » 114
Leggi del coseno . . . . . » 117

Riflessione . . . . . » 119

Specchi piani . . . . . *Pag.* 121

Specchi sferici . . . . . » 123

Proprietà degli specchi concavi . . . . . » 123
Immagine di un punto . . . . . » 126
Immagine di un oggetto . . . . . » 127
Specchi convessi . . . . . » 130

Rifrazione . . . . . » 130

Luce bianca e luce monocromatica . . . . . » 132
Indice assoluto di rifrazione . . . . . » 134
Angolo limite . . . . . » 136
Rifrazione atmosferica . . . . . » 139
Lastra a faccie parallele . . . . . » 142
Prisma . . . . . » 143

Lenti . . . . . » 145

Lenti convergenti . . . . . » 146
Fuochi coniugati . . . . . » 147
Centro ottico . . . . . » 148
Immagini nelle lenti convergenti . . . . . » 149
Lenti divergenti . . . . . » 153

Acromatismo . . . . . » 154

Occhio . . . . . » 156

Accomodamento dell' occhio . . . . . » 158
Ametropie visive e loro correzione . . . . . » 159
Persistenza delle sensazioni visive . . . . . » 160
Cinematografo . . . . . » 161
Percezione del rilievo . . . . . » 162
Stereoscopio . . . . . » 162

Strumenti ottici . . . . . » 163

Apparecchio di proiezione . . . . . » 163
Lente di ingrandimento o microscopio semplice . . . » 164
Microscopio composto . . . . . » 164
Cannocchiale . . . . . » 165
Binocolo a prismi . . . . . » 166
Cannocchiale di Galileo . . . . . » 167

Velocità della luce . . . . . » 167

Ipotesi ondulatoria della luce . . . . . » 169

Lunghezze d' onda e velocità della luce . . . . . » 173

Studio delle radiazioni . . . . . » 175

Spettroscopio . . . . . » 176
Spettri di emissione . . . . . » 179

Spettro del sole . . . . . *Pag.* 180
Assorbimento delle radiazioni . . . . . » 183
Colore dei corpi . . . . . » 184
Legge di Kirchhoff . . . . . » 185

Fotografia . . . . . » 187

Macchina fotografica . . . . . » 188
Fotografia a colori . . . . . » 189

ELETTRICITÀ E MAGNETISMO.

Lo stato elettrico . . . . . » 191

Stato elettrico vitreo e resinoso . . . . . » 191
Conduttori e coibenti . . . . . » 192
Elettroscopi . . . . . » 194

Fenomeno di influenza . . . . . » 197

Schermi elettrici . . . . . » 198

Pila . . . . . » 198

Quantità di elettricità . . . . . » 200

Cilindro di Faraday . . . . . » 200
Quantità di elettricità positive e negative . . . . . » 202
Sede della carica elettrica . . . . . » 205
Legge di Coulomb . . . . . » 206

Potenziale elettrico . . . . . » 208

Potenziale di una pila . . . . . » 210
Misura dei potenziali . . . . . » 212
Scintilla elettrica . . . . . » 215
Forza elettromotrice . . . . . » 216

Capacità elettrostatica . . . . . » 216

Condensatori . . . . . » 220

Distribuzione dell' elettricità sui conduttori . . . . . » 224

Macchine elettrostatiche . . . . . » 225

Macchina di Ramsden . . . . . » 226
Macchina di Wimshurst . . . . . » 231

Elettricità di contatto . . . . . » 233

Esperienze di Volta . . . . . » 234
Leggi di Volta . . . . . » 235

Termoelettricità . . . . . » 236

Pile termoelettriche . . . . . » 237

La corrente elettrica . . . . . *Pag.* 238
Senso della corrente elettrica . . . . . » 238
Effetti chimici della corrente . . . . . » 240
Voltametri . . . . . » 243
Leggi dell' elettrolisi . . . . . » 244
Intensità di corrente . . . . . » 246
Applicazioni dell' elettrolisi . . . . . » 249
Dissociazione elettrolitica . . . . . » 251
Teoria della pila . . . . . » 252
Polarizzazione . . . . . » 253
Pile a depolarizzante . . . . . » 254
Accumulatori . . . . . » 256
Magnetismo . . . . . » 259
Magneti permanenti e temporanei. . . . . » 259
Poli magnetici . . . . . » 260
Esperienza della calamita spezzata . . . . . » 261
Legge di Coulomb . . . . . » 262
Campo magnetico . . . . . » 264
Spettri magnetici . . . . . » 265
Induzione magnetica . . . . . » 268
Magnetismo terrestre . . . . . » 270
Declinazione e inclinazione magnetica . . . . . » 271
Carte magnetiche . . . . . » 272
Bussola marina . . . . . » 274
Effetti magnetici della corrente . . . . . » 275
Regola della mano destra . . . . . » 275
Galvanometri . . . . . » 277
Amperometri . . . . . » 280
Elettrocalamite . . . . . » 281
Soneria elettrica . . . . . » 284
Telegrafo . . . . . » 285
Azioni elettrodinamiche . . . . . » 286
Legge di Ohm . . . . . » 287
Resistenza elettrica . . . . . » 289
Leggi della resistenza elettrica . . . . . » 290
Reostati . . . . . » 293
Legge di Ohm . . . . . » 295
Effetti termici della corrente . . . . . » 297
Legge di Joule . . . . . » 298
Applicazioni degli effetti termici della corrente . . . . » 300
Fenomeno Peltier . . . . . » 303

Energia elettrica . . . . . *Pag.* 304

Varie espressioni dell' energia elettrica . . . . . » 304
Campo elettrico . . . . . » 305
Estensione del concetto di potenziale . . . . . » 307

Induzione elettromagnetica . . . . . » 308

Coefficienti d' induzione . . . . . » 308
Fenomeni di induzione . . . . . » 310
Legge di Lenz . . . . . » 312
Estracorrenti . . . . . » 312
Leggi quantitative dell' induzione . . . . . » 313
Rocchetto di Ruhmkorff . . . . . » 316
Telefono . . . . . » 318

Macchine magnetoelettriche e dinamoelettriche . . . » 321

Anello di Pacinotti . . . . . » 327
Alternatori . . . . . » 330
Motori elettrici . . . . . » 331
Campo rotante . . . . . » 334

Trasporto dell' energia . . . . . » 336

Trasformatori . . . . . » 337

Onde elettromagnetiche . . . . . » 338

Scariche oscillatorie . . . . . » 338
Esperienze di Feddersen . . . . . » 343
Oscillatore di Hertz . . . . . » 345
Risonatore di Hertz . . . . . » 347
Coherer . . . . . » 351
Telegrafo senza filo . . . . . » 352

Ioni ed elettroni . . . . . » 354

Ioni gassosi . . . . . » 354
Vari aspetti della scarica nell' aria . . . . . » 358
Fulmine . . . . . » 360
Elettricità atmosferica . . . . . » 361
Scarica nei gas rarefatti . . . . . » 362
Raggi catodici . . . . . » 363
Raggi anodici . . . . . » 366
Corpuscoli. - Elettroni . . . . . » 368
Raggi di Röntgen . . . . . » 369

Radioattività . . . . . » 372

Irraggiamento dei corpi radioattivi . . . . . » 373
Disintegrazione radioattiva . . . . . » 376

INDICE ALFABETICO

A

	Pagina
Accomodamento	158
Accumulatori	256
Acromatismo	154
Affinità chimica	90
Alisei	98
Alternatori	330
Ametropie visive	159
Ampère (unità)	246
Amperometri	280
Analisi spettrale	180
Anello di Pacinotti	327
Angolo limite	136
Anione	241
Anodo	241
Apertura	123-146
Apparecchio di proiezione	163
Arcobaleno	240
Arco voltaico	301
Aria liquida	73
Armature	220
Asse principale	123-145
Asse secondario	123-148
Assoluta [temperatura]	83
Assorbimento del calore	45
Assorbimento della luce	110
Assorbimento [spettro di]	183
Astatico [sistema]	278
Aurore polari	371
Autoeccitazione	328
Autoinduzione	309-313
Azioni elettrodinamiche	286

B

Bande [spettro a]	179
Belli [duplicatore del]	230
Biella	86
Bilancia di torsione	206-263
Binocolo a prismi	166
Binocolo comune	167
Bottiglia di Lane	223
Bottiglia di Leida	222
Brachimetropismo	159
Brezze	99
Brina	105
Bunsen [calorimetro di]	35
Bunsen [fotometro di]	115
Burrasca magnetica	272
Bussola marina	274

C

Cagnard de la Tour [fenomeno di]	69
Calamite	259
Caldaia	85
Calefazione	67
Calore animale	90
Calore di fusione	49
Calore di soluzione	54
Calore di vaporizzazione	62
Calore solare	91
Calore specifico	34
Caloria	32
Calorimetro a ghiaccio	33
Calorimetro di Bunsen	35
Calori specifici dei gas	84
Campioni di luce	116
Campo elettrico	305
Campo magnetico	264
Campo rotante	334
Campo uniforme	267
Candela decimale	117
Cannocchiale	165

	Pagina
Capacità elettrostatica	217
Capacità termica	34
Cariche elettriche	201
Carte magnetiche	272
Cascata [in]	222
Cassette di resistenza	294
Cassetto di distribuzione	86
Catione	241
Catodo	241
Celsius [scala]	10
Centro ottico	148
Cilindro	85
Cilindro di Faraday	200
Cinematografo	161
Cinetica [teoria]	80
Cirri	106
Coefficiente di dilatazione cubica	16
Coefficiente di dilatazione lineare	15
Coefficiente di tensione	26
Coefficienti d' induzione	308
Coherer	351
Coibenti	192
Collettore	327
Colori complementari	174
Colori dei corpi	184
Colori [fotografia a]	189
Compressione dei gas	82
Condensatore	85-163
Condensatori elettrici	220
Conducibilità apparente	41
Conducibilità assoluta	40
Conducibilità elettrica	290
Conduttori	192
Conduzione del calore	40
Congelamento delle soluzioni	54
Conservazione dell' elettricità	203
Convezione del calore	46
Corpi isotropi	16
Corpi radioattivi	372
Corpuscoli	369
Corrente alternata	325
Corrente elettrica	238
Correnti di Foucault	315
Correnti indotte	311
Costante solare	91
Coulomb [leggi di]	206-262
Coulomb (unità)	208
Crioscopico [metodo]	54
Cumuli	106

D

Daniell [pila]	254
Declinazione magnetica	271
Densità assoluta	58
Densità elettrica	225
Densità [massimo di]	20
Densità relativa	59
Depolarizzante [pile a]	254
Derivazione [in]	212-291
Deviazione minima	144
Dewar [vasi del]	72
Dielettrico	219
Diffusione della luce	110-120
Dilatazione apparente	18
Dilatazione assoluta	18
Dilatazione cubica	16
Dilatazione dei gas	23
Dilatazione lineare	12
Dilatometri	22
Dinamo	321-326
Diottria	160
Dispersione della luce	133
Dissociazione elettrolitica	251
Distanza focale	126-146
Distribuzione a cassetto	86
Dulong e Petit [legge di]	38
Dulong e Petit [metodo di]	21
Duplicatore del Belli	230

E

Ebollizione	63
Ebollizione delle soluzioni	67
Eccentrico	87
Eccitazione delle dinamo	328
Ecclissi	112
Effluvio	215
Elemento di pila	198
Elettricità atmosferica	361
Elettrocalamite	283
Elettrodi	199
Elettrodinamiche [azioni]	286
Elettroforo	227
Elettrolisi	241
Elettrometro	195
Elettromotrice [forza]	216
Elettroni	369
Elettroscopi	194
Elettroscopio condensatore	233
Emanazioni	374
Emissione [spettro di]	179
Endotermiche [reazioni]	90
Energia atomica	82
Energia elettrica	304
Energia interatomica	377
Energia interna	81
Epino [condensatore di]	221
Equatore magnetico	274
Equazione caratteristica	30
Equivalente meccanico del calore	78

	Pagina
Equivalenti elettrochimici	245
Esotermiche [reazioni]	90
Espansione dei gas	82
Esperienze di Feddersen	343
Esperienze di Volta	234
Estracorrenti	312
Etere cosmico	171
Evaporazione	55
Evaporazione delle soluzioni	67

F

Fabbricazione del ghiaccio	75
Fahrenheit [scala]	10
Faraday [cilindro di]	200
Faraday [leggi di]	246
Farad (unità)	218
Feddersen [esperienze di]	343
Fenomeno di Cagnard de la Tour	67
Fenomeno Peltier	303
Fizeau [metodo di]	168
Flusso di forza	268-308
Flusso d' induzione	270
Forno elettrico	303
Forza controelettromotrice	333
Forza elettrica	305
Forza elettromotrice	216
Forza e. m. indotta	314
Forza magnetica	264
Forza termoelettromotrice	237
Forza viva molecolare	81
Fotografia	187
Fotometria	113
Fotometro di Bunsen	115
Fotometro di Foucault	115
Frangie di interferenza	170
Franklin [quadro di]	221
Fraunhofer [righe di]	180
Frigoria	33
Foucault [correnti di]	315
Foucault [fotometro di]	115
Fulmine	360
Fuochi coniugati	125-147
Fuoco pricipale	125-130-146
Fusione	46

G

Galileo [cannocchiale di]	167
Galvanometro Deprez-D'Arsonval	278
Galvanometro Nobili	277
Galvanoplastica	251
Galvanostegia	250
Gas ideali	27
Gas reali	28
Gay-Lussac [leggi di]	24
Ghiaccio artificiale	75
Gradi	10
Grandine	107
Grenet [pila]	255

I

Igrometrico [stato]	101
Igrometro di Regnault	101
Igrometro di Saussure	103
Immagini reali	126-150
Immagini virtuali	122-152
Inclinazione magnetica	271
Indice assoluto	134
Indice di rifrazione	132-135
Indice inverso	136
Indice relativo	132
Indotto ad anello	326
Indotto [circuito]	311
Inducente [circuito]	311
Induzione elettromagnetica	310
Induzione magnetica	269
Influenza [fenomeno d']	197
Infrarosso [spettro]	178
Ingrandimento	128
Intensità del campo	264-305
Intensità di illuminazione	114
Intensità luminosa	114
Interferenza della luce	169
Interruttore	316
Inversione dello spettro	186
Ioni	241-251
Ioni gassosi	354
Ionizzazione	355
Ipermetropismo	159
Ipotesi ondulatoria	169
Irraggiamento	43
Isogone	272
Isochimene	97
Isocline	272
Isolatori	193
Isotere	97
Isoterme	97
Isotropi [corpi]	16

J

Joule [legge di]	299
Joule (unità)	300

K

	Pagina
Kilowatt	304
Kirchhoff [legge di]	185

L

Lamina magnetica	281
Lampada di sicurezza	42
Lampade elettriche	300
Lane [bottiglia di]	223
Lastra a faccie parallele	142
Lavoro interno	82
Leclanché [pila]	255
Legge delle distanze	114
Leggi di Coulomb	206-262
Legge di Dulong e Petit	38
Legge di Joule	299
Legge di Kirchhoff	185
Legge di Lenz	312
Legge di Mathias	63
Legge di Neumann	314
Legge di Ohm	295
Leggi del coseno	117
Leggi dell' induzione	313
Leggi di Faraday	246
Leggi di Gay-Lussac	24
Leggi di Volta	235
Leida [bottiglia di]	222
Lenti acromatiche	155
Lenti convergenti	145
Lenti divergenti	145-153
Lenz [legge di]	312
Letture a riflessione	279
Linee di forza	265-305
Linee isotermiche	96
Liquefazione	68
Liquefazione dell' aria	72
Luce bianca	132
Luce monocromatica	132
Luminosi [corpi]	109
Lunghezza d' onda	172

M

Macchina di Ramsden	226
Macchina di Wimshurst	230
Macchina fotografica	188
Macchine a vapore	85
Macchine dinamo-elett.	321
Macchine elettrostatiche	225
Macchine magneto-elett.	321
Magneti	259
Magnetismo residuo	260
Magnetismo terrestre	270
Mascart [isolatore di]	194
Mathias [legge di]	63
Mayer [principio di]	76
Meridiano magnetico	271
Mescolanze refrigeranti	54
Meteore acquee	104
Meteorologia	93
Metodo crioscopico	54
Metodo delle mescolanze	36
Mezzi rifrangenti	134
Mezzo ottico	130
Microfarad	218
Microfono	320
Micron	173
Microscopio	164
Miopia	159
Miraggio	140
Moltiplicatore	276
Monsoni	99
Motori a campo rotante	334
Motori a scoppio	88
Motori bifasi e trifasi	336
Motori elettrici	331
Motori sincroni	334
Motrice fissa	87
Mutamenti di stato	46

N

Nebbia	105
Nembi	106
Neumann [legge di]	314
Neve	107
Neve di anidride carbonica	71
Nubi	106

O

Obbiettivo	163-164
Occhio	156
Ohm [legge di]	295
Ohm (unità)	290
Ombra	111
Onde elettromagnetiche	346
Opachi [corpi]	109
Oscillatore di Hertz	345
Oscuri [corpi]	109
Ottica	109

P

	Pagina
Pacinotti [anello di]	327
Palmieri [esperienza del]	322
Parafulmine	360
Parete fredda	61
Peltier [fenomeno]	303
Pennello di luce	111
Penombra	111
Pentola di Papin	66
Percezione del rilievo	162
Periodo annuo	96
Periodo diurno	94
Permeabilità	269
Petit [legge di Dulong e]	38
Petit [metodo di Dulong e]	21
Pila	198
Pila termoelettrica	181
Pila Weston	213
Pile a depolarizzante	254
Pirocliometri	91
Polarizzazione	253
Poli della pila	199
Poli magnetici	260
Polveri elettroscopiche	194
Potenziale	208-307
Potere assorbente	185
Potere emissivo	185
Potere illuminante	114
Potere induttore specifico	220
Pouillet [piroeliometro]	91
Presbitismo	158
Primario [circuito]	311-316
Principio della parete fredda	61
Principio di Mayer	76
Prisma	143
Prisma acromatico	155
Prisma a riflessione totale	138
Proiezione [apparecchio di]	163
Propagazione della luce	171
Propagazione rettilinea	110
Psicrometro	102
Punti fissi	10
Punto critico	70
Punto di ebollizione	64
Punto di fusione	47
Punto di solidificazione	48
Pupilla	157

Q

Quadranti	195
Quantità di calore	31
Quantità di elettricità	201
Quantità di freddo	33
Quantità di magnetismo	263

R

Radiazioni	174
Radioattività	372
Radiografia	370
Raggi anodici	366
Raggi catodici	363
Raggi di Röntgen	369
Raggi luminosi	111
Raggio incidente	119-131
Raggio riflesso	119
Raggio rifratto	131
Rami derivati	247-291
Ramsden [macchina di]	226
Réaumur	10
Reazioni secondarie	241
Refrigerante	85
Refrigeranti [mescolanze]	54
Regnault [igrometro di]	101
Regola della mano destra	275
Reofori	239
Reostati	293
Resistenza [cassette di]	294
Resistenza elettrica	289
Resistenza interna	293
Resistenza specifica	292
Retina	156
Riflessione della luce	110-119
Riflessione [leggi della]	119
Riflessione totale	137
Rinfrangenti [mezzi]	134
Rifrazione astronomica	139
Rifrazione atmosferica	139
Rifrazione [leggi della]	131
Rigelo	52
Righe [spettro a]	179
Riscaldamento elettrico	302
Risonatore di Hertz	347
Rocchetto di Ruhmkorff	316
Rugiada	105

S

Satura [soluzione]	53
Saturo [vapore]	56
Saussure [igrometro di]	103
Scala termica	5
Scala termometrica	8
Scarica nei gas rarefatti	362
Scarica nell' aria	358
Scariche atmosferiche	361
Scariche oscillatorie	338
Schermi elettrici	198
Schermi magnetici	270
Scintilla	215
Scoppio [motori a]	88
Secondario [circuito]	311-316

	Pagina
Senzazioni termiche	5
Serie [in]	212
Serrafili	200
Sistema astatico	278
Solare [spettro]	180
Solenoidi	281
Solidificazione	48
Soluzione	52
Soneria elettrica	284
Soprafusione	49
Soprariscaldamento	64
Soprasaturazione	53-60
Sorgenti di calore	89
Sorgenti di elettricità	226
Sorgenti di luce	109
Spazio oscuro	363
Spazzole	323
Specchi concavi	123
Specchi convessi	123-130
Specchi piani	121
Specchi sferici	123
Spettri magnetici	265
Spettro	133
Spettro continuo	176
Spettro puro	175
Spettroscopio	176
Spinterometro	223
Splendore	117
Stato elettrico	191
Stato sferoidale	66
Stereoscopio	162
Strati	106
Stratificazioni	363
Successione termica	5
Superficie [in]	222

T

Tasto	285
Telefono	318
Telegrafo	285
Telegrafo senza filo	352
Temperatura	5
Temperatura assoluta	83
Temperatura critica	70
Temperatura media	94
Tensione dei gas	25
Tensione dei vapori	56
Tensione elettrica	225
Teoria cinetica	80
Termica [scala]	5
Termoelettricità	236
Termometro	8
Termometro a gas	28
Termometro a massima	95
Termometro a minima	96
Translucidi [corpi]	110
Trasformatori	337
Trasparenti [corpi]	109
Trasporto dell' energia	337

U

Ultravioletto [spettro]	179
Umidità assoluta	100
Umidità relativa	100
Unità di luce	116

V

Valvole fusibili	302
Vapore [macchine a]	85
Vapori saturi	56
Vapori soprasaturi	60
Vaporizzazione	55
Vasi del Dewar	72
Velocità della luce	168
Velocità molecolare	81
Venti	98
Vertice	123
Violle (unità)	116
Virtuali [immagini]	122-152
Volano	86
Volta [elettroforo di]	227
Volta [esperienze di]	234
Volta [leggi di]	235
Volta (unità)	214
Voltaico [elemento]	199
Voltametri	243
Voltmetri	294

W

Watt	304
Weston [pila]	213
Wimshurst [macchina di]	230

Z

Zamboni [pila]	199
Zero assoluto	84